

AALTO-YLIOPISTO

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Insinöörیتieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta

Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos

Pohjarakennus ja maamekaniikka

JARMO PESU

ROUTANOUSUKOKEEN KEHITTÄMINEN

Pohjarakennuksen ja maamekaniikan syventymiskoh-
teen diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkas-
tettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 16.2.2010

Valvoja: Professori Olli Ravaska

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Henry Gustavsson

Tekijä:	Jarmo Pesu	
Diplomityö:	Routanousukokeen kehittäminen	
Päivämäärä:	16.2.2010	Sivumäärä: 70+9 liitettä
Professuuri:	Pohjarakennus ja maamekaniikka	Koodi: Rak-50
Valvoja:	Prof. Olli Ravaska	
Ohjaaja:	DI Henry Gustavsson	
Avainsanat:	routanousukoe, routimiskerroin, routanousu, routaselli	

Laboratoriossa suoritettavaan routanousukokeen tulokset ovat herkkiä käytettyjen koejärjestelyjen vaikutuksille. Eripuolilla maailmaa on olemassa useita menettelytapoja kokeen suorittamiseen, mutta kansainvälisesti hyväksyttyä standardia ei ole vielä saatu aikaiseksi. Routanousukokeesta annettava tulos ei ole myöskään joka maassa laadullisesti sama. Tuloksina voidaan antaa mm. routimiskerroin, routanousu päivässä, suhteellinen routanousu tai kokonaisroutanousu. Suuri osa määritettävistä suureista kuitenkin riippuu mitatusta routanoususta.

Routasellin ja maanäytteen välillä vaikuttava kitka on suurin yksittäinen tuloksiin vaikuttava tekijä. Kirjallisuudessa on esitetty erilaisia tapoja kitkan vaikutuksen vähentämiseksi. Eri maissa tällä hetkellä käytössä olevien laitteistojen kitkanhallinta perustuu pääasiassa joko sellirakenteen rengasjakoon tai sellimateriaalin alhaiseen kitkaan.

Tässä työssä keskityttiin tarkastelemaan kahden erilaisen routanousukoelaitteen antamien tulosten eroavaisuuksia. Tutkimusta varten rakennettiin rengasselli ja teflonvaippainen halkaistava selli. Laitteistot rakennettiin samoihin dimensioihin ja niissä käytettiin samalaista mittausrakennetta ja tiedonkeruujärjestelmää. Laitteistot rakennettiin soveltaen Suomessa jo käytössä olevien routanousukoelaitteiden piirustuksia ja kaavakuvia. Testimateriaaleina käytettiin siltiä ja hiekkaa. Koesarja koostui yhteensä kahdeksasta routanousukokeesta: molemmilla testimateriaaleilla suoritettiin kaksi koetta halkaistavassa sellissä ja rengassellissä. Maanäytteet rakennettiin vakiotyömäärällä käyttäen kiertotiivistyslaitetta. Siltillä havaittiin suurempi taipumus routimiseen kuin hiekalla. Molemmilla testimateriaaleilla rengasselli tuotti voimakkaamman routanousun kuin halkaistava selli. Testimateriaaleille suoritettiin myös indeksikokeita niiden routivuuden määrittämiseksi ja tarjoamaan vertailutietoa routanousukokeista määritettyihin tuloksiin. Halkaistavalla sellillä suoritettavat routanousukokeet antoivat lähes samat routivuusluokitukset kuin indeksikokeet, kun taas rengassellillä suoritettavat kokeet olivat osittain ristiriitaisia indeksikokeiden tulosten kanssa.

AALTO UNIVERSITY
SCHOOL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

Faculty of Engineering and Architecture

ABSTRACT OF THE
MASTER'S THESIS

Author:	Jarmo Pesu	
Thesis:	Development of frost heave test	
Date:	16.2.2010	Number of pages: 70+9 app.
Chair:	Soil mechanics and Foundation Engineering	Code: Rak-50
Supervisor:	Prof. Olli Ravaska	
Instructor:	M.Sc. Henry Gustavsson	
Key words:	frost heave test, frost heave coefficient, frost heave, frost heave apparatus	

Frost heave tests conducted in laboratory conditions are very sensitive to the testing arrangements in which they are executed. There are numerous protocols in different countries but an internationally acknowledged procedure for frost heave test has not yet been established. Therefore the results determined from frost heave tests are not always of the same magnitude. Frost heave test result can be presented as frost heave coefficient, frost heave per day, frost heave percent or total frost heave. Nevertheless all these magnitudes are dependent on the frost heave measured during the test.

Friction, between a frost cell and a sample material, is considered to be the most critical factor affecting the determined results. Literature knows various methods on how to reduce the limiting effect of friction. Apparatuses currently in use in different countries apply mainly two different approaches to friction control. A frost heave cell can be cut up to multiple rings thus limiting the effect of friction to the height of one ring. Another approach is to render the frost heave cell with substance of little friction, silicon lubricate for instance.

This study was focused on the comparison of the frost heave test results determined from two different test apparatuses. A multi-ring cell and a Teflon covering cell with splitting property were constructed for the study. Dimensions of these cells were the same. The instrumentations and the data acquisition methods were also the same for both of the tests. The apparatuses were built according to available plots and schematic figures of devices already in use in Finland. Tested soil materials were silt and sand. Test series consisted out of eight frost heave tests: both soils were tested twice on both apparatuses. Soil samples were prepared with a constant compaction effort using an ICT (intensive compaction tester) machine. Generally silt showed higher frost heave characteristics compared to sand. Higher magnitudes in frost heave were observed with the multi-ring cell for both of these soils. Additional index tests were also conducted on both soil materials to evaluate their frost susceptibility. The Teflon cell provided consistent results compared to the index tests. The results determined with the multi-ring cell were somewhat inconsistent with the index tests and suggested higher frost susceptibility.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Teknillisessä korkeakoulussa DI Henry Gustavssonin ohjauksessa. Työtä on valvonut pohjarakennuksen ja maamekaniikan professori Olli Ravaska.

Projektiorganisaatioon kuuluivat edellä mainittujen lisäksi laboratorioteknikko Matti Ristimäki ja yli-insinööri Veli-Antti Hakala.

Haluan kiittää edellä mainittuja henkilöitä heidän projektiin antamastaan työpanoksesta, sekä hyvistä neuvoista ja kommenteista. Lisäksi haluan kiittää koko pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratorion henkilökuntaa.

Espoossa 16.2.2010

Jarmo Pesu

MERKINNÄT

c	ominaislämpö [J/kgK]
g	putoamiskiihtyvyys 9,807 [m/s ²]
h	routanousu [mm]
m	massa [kg]
q	olomuodonmuutoslämpö [Wh/m ³]
q _j	veden jäätymislämpö 93 [Wh/kg]
t	aika [s, h, d]
v	routanousunopeus [mm/h]
w	vesipitoisuus [%]
w _L	juoksuraja [%]
w _p	plastisuusraja [%]
w _u	jäätyneessä maassa sulana pysyvän veden määrä [%]
v _w	veden virtausnopeus [m/h]
C _f	maan tilavuuslämpökapasiteetti jäätyneenä [Wh/m ³ K]
C _u	maan tilavuuslämpökapasiteetti sulana [Wh/m ³ K]
C _w	veden tilavuuslämpökapasiteetti, 1163 [Wh/m ³ K]
D ₆₀	rakeisuuskäyrän 60 % läpäisyyarvoa vastaava raekoko [mm]
D ₁₀	rakeisuuskäyrän 10 % läpäisyyarvoa vastaava raekoko [mm]
F	pakkasmäärä [Kh]
H	näytteen alkukorkeus [mm]
I _L	juoksevuusluku [%]
I _p	plastisuusluku [%]
Q	lämpömäärä [J]
R _f	hienoustekijä
T	lämpötila [°C, K]
T _a	pakkaskauden keskilämpötila [°C]
T _m	vuoden keskilämpötila [°C]
SP ₀	routimiskerroin [mm ² /Kh]
SP(t)	segregaatiopotentiaali [mm ² /Kh]
V	tilavuus [m ³]
Z	roudan syvyys [mm, m]
Z _j	jäätyneen näytteenosan korkeus [mm]
Z _s	sulan näytteenosan korkeus [mm]
γ	märkätilavuuspaino [N/m ³]
γ _d	kuivatilavuuspaino [N/m ³]
λ _f	jäätyneen maan lämmönjohtavuus [W/mK]
λ _l	lämmönjohtavuuden laskenta-arvo [W/mK]

λ_u	sulan maan lämmönjohtavuus [W/mK]
ρ_d	kuivairtoteihs [kg/m ³]
ρ_i	jään ominaistihs [kg/m ³]
ρ_w	veden ominaistihs [kg/m ³]

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

MERKINNÄT

1.	JOHDANTO	4
1.1	Yleistä	4
1.2	Tutkimuksen kohdennus ja rajausta	4
1.3	Tutkimusmenetelmät.....	5
2.	MAAN ROUTAANTUMINEN	6
2.1	Määritelmiä	6
2.2	Routimiskriteerit	6
2.2.1	Yleistä	6
2.2.2	Rakeisuus	8
2.2.3	Konsistenssi.....	9
2.2.4	Hienoustekijä.....	10
2.2.5	Kapillaarinen nousukorkeus.....	10
2.2.6	Routanousukokeet.....	11
2.3	Maan lämpötekniset ominaisuudet	11
2.3.1	Yleistä	11
2.3.2	Lämmönjohtavuus	11
2.3.3	Ominaislämpö.....	12
2.3.4	Tilavuuslämpökapasiteetti.....	13
2.3.5	Olomuodonmuutoslämpö.....	13
2.3.6	Roudan syvyyden laskenta.....	15
2.4	Routanousu.....	16
2.4.1	Veden osuus jäätyvässä maassa.....	16
2.4.2	Lämpötilaolosuhteet maan jäätyessä	17
2.4.3	Jäälinsin muodostumisen mekanismi	18

3.	YLEISESTI KÄYTETTYJÄ ROUTANOUSUKOELAITTEISTOJA	21
4.	LASKENTAMALLI	23
4.1	Segregaatiopotentiaali.....	23
4.2	Routimiskerroin	24
4.3	Muut routanousukokeesta määritettävät suureet	25
5.	KOELAITTEISTON KUVAUS	27
5.1	Yleistä	27
5.2	Kylmäkaappi.....	28
5.3	Kansielementti.....	28
5.4	Pohjaelementti	29
5.5	Kuormituskehä.....	29
5.6	Halkaistava selli.....	30
5.6.1	Yleistä	30
5.6.2	Vaipparakenne.....	30
5.7	Rengasselli.....	31
5.7.1	Yleistä	31
5.7.2	Vaipparakenne.....	32
5.8	Instrumentointi.....	32
5.8.1	Lämpötila-anturit	32
5.8.2	Siirtymäanturi.....	34
5.8.3	Tiedonkeruujärjestelmä.....	34
6.	KOKEISSA KÄYTETYT MAA-AINEKSET	36
6.1	Testimateriaalit	36
6.2	Näytteen valmistus.....	38
7.	TULOKSET.....	40
7.1	Yleistä	40
7.2	Halkaistava selli.....	43
7.3	Rengasselli.....	49
7.4	Tulosten vertailua	55
7.4.1	Halkaistava selli.....	55
7.4.2	Rengasselli	56

7.4.3	Siltti ”Lahti”	58
7.4.4	Hiekka ”Tre2”	60
7.4.5	Tulosten yhteenveto.....	61
8.	JOHTOPÄÄTÖKSET	66
9.	LÄHDELUETTELO	68

1. JOHDANTO

1.1 Yleistä

Maaperän routivuus tulee aina ottaa huomioon suunniteltaessa rakennuksia, teitä ja muita rakenteita. Routanousun aiheuttamia vaurioita rakennuksille pyritään lieventämään sijoittamalla perustukset roudattomaan syvyyteen tai käyttämällä routaeristeitä. Maarakenteille lievä routanousu yleensä sallitaan. Routanousun aiheuttamat siirtymät eivät saa kuitenkaan rajoittaa rakenteen käyttöä tai aiheuttaa sille vaurioita. (Saarelainen, 1992)

Maalajin taipumus routimiseen jäätymisolosuhteissa määräytyy pitkälti raekoon, huokosjakauman, veden saatavuuden, kuormituksen ja lämmönsiirtyvyyden mukaan (Konrad, 1994). Maalajit voidaan luokitella routiviin ja routimattomiin. Yleisin luokittelu tehdään raekokojakauman mukaan. Kvalitatiivinen luokittelu (routiva/routimaton) ei ole kuitenkaan aina riittävä tieto, vaan tarvitaan tietoa siitä, miten paljon maalaji routii. Kvantitatiivinen määrittely voidaan saavuttaa laboratoriossa suoritettavilla routanousukokeilla tai maastossa suoritettavilla in situ -havainnoilla.

Laboratoriossa suoritettavaan routanousukokeeseen on olemassa useita standardeja, mutta menettelytavat vaihtelevat eri maissa ja jopa maiden sisällä (Lahtinen, 2001). Routanousukokeesta saatavat tulokset ovat herkkiä useiden tekijöiden vaikutuksille: mm. koelaitteisto, käytetyt raja-arvot ja maanäytteen ominaisuudet vaikuttavat saatuihin tuloksiin (Kujala, 1991). Eri laitteistoilla saadut tulokset eivät näin ollen ole suoraan vertailtavissa keskenään. Eri maissa käytettyjen laitteistojen eroavaisuuksia on kuitenkin pyritty selvittämään kansainvälisessä työryhmässä CEN TC 227, Working Group 4, Task Group 5 – Frost susceptibility. Työryhmän tavoitteena oli kerätä tietoja käytössä olevista laitteistoista ja niiden toimintaperiaatteista. Näiden tietojen pohjalta laadittaisiin ehdotus eurooppalaisesta standardilaitteistosta. Työ on kuitenkin kesken, eikä standardia saatane lähivuosien aikana.

Routasellin ja maanäytteen välistä kitkaa pidetään suurimpana yksittäisenä ongelmana ja tuloksien vertailtavuutta vaikeuttavana tekijänä. Kujala (1991) on esittänyt väitöskirjassaan erilaisia ratkaisuja kitkan vaikutuksen pienentämiseen. Suomessa on tällä hetkellä käytössä useita erilaisia routanousukoelaitteistoja, mm: Valtion Teknillisen Tutkimuskeskuksen (VTT) halkaistava routaselli ja Tampereen Teknillisen Yliopiston (TTY) rengasselli. Nämä kaksi sellirakennetta ovat yleisiä myös muissa Euroopan maissa (Horvli, 2008).

1.2 Tutkimuksen kohdennus ja rajaus

Tässä tutkimuksessa keskitytään tarkastelemaan halkaistavan sellin ja rengassellin antamien tuloksien eroja, kun molemmat laitteet on rakennettu samoihin dimensioihin, niissä käytetään samoja mittausantureita ja testattava maa-aines on sama.

1.3 Tutkimusmenetelmät

Routanousukokeita varten rakennettiin kaksi routanousukoelaitteistoa, yksi halkaistava selli ja yksi rengasselli. Laitteistot rakennettiin soveltaen käytettävissä olevia piirustuksia ja kaavakuvia toiminnassa olevista laitteista. Molemmissa laitteistoissa käytettiin samoja mitausantureita ja tiedonkeruujärjestelmää. Tutkittaviksi maa-aineksiksi valittiin siltti ja hiekka. Koestusohjelmaan sisältyi yhteensä kahdeksan routanousukoetta: kummallakin testimateriaalilla suoritettiin kaksi koetta sekä halkaistavalla sellillä että rengassellillä.

2. MAAN ROUTAANTUMINEN

2.1 Määritelmiä

Routaan liittyviä yleisesti käytettyjä käsitteitä, joihin tässä työssä tullaan viittaamaan: (RIL 121-1988, 1988)

- Roudalla tarkoitetaan maan huokosissa olevan veden jäätyminen johdosta jäätynyttä maakerrosta.
- Routaantuminen on maassa olevan veden jäätymistä eli maan jäätymistä.
- Routimisella tarkoitetaan ilmiötä, jossa maakerroksen routaantuessa sen tilavuus kasvaa. Routivan maakerroksen tilavuuden kasvu ilmenee maanpinnan kohoamisena eli routanousuna tai nousun esteenä oleviin rakenteisiin kohdistuvana routimis-paineena. Routineen maan sulaminen aiheuttaa kantavuuden heikkenemisen kautta sulamispainuman tai kelirikon.

2.2 Routimiskriteerit

2.2.1 Yleistä

Routiminen viittaa maan jäätymisestä ja sulamisesta aiheutuviin, mahdollisesti haitallisiin ilmiöihin, joita ovat mm. routanousu ja sulamispehmeneminen. Pääasiallisesti routimisen aiheuttavat jäälinssit, jotka muodostuvat routaantuvassa kerroksessa. Vesi kulkeutuu routaantuvaan kerrokseen sulasta maasta ja näin ollen jäälinssit kasvattavat jäätyvän maan tilavuutta, mikä yleensä näkyy maan pinnalla routanousuna. (Nurmikolu, 2005)

Maalajia, joka mahdollistaa jäälinssien muodostumisen kutsutaan routivaksi. Yleiset edellytykset routimiselle ovat: (Saarelainen, 1992)

- maa jäätyy
- jäätyvä maa on routivaa
- veden kulkeutuminen jäätymisrintamaan on mahdollista.

Mikäli yksikin yllä mainituista kolmesta edellytyksestä ei täyty, jäälinssien muodostuminen ei ole mahdollista. Lisäksi routimisesta aiheutuvan paineen tulee ylittää yläpuolisen rakenteen painon, jotta routanousu voi tapahtua. (Nurmikolu, 2005)

Kirjallisuudessa on määritelty yli sata erilaista menetelmää maalajin routivuuden luokitteluun (Chamberlain, 1981). Routimiskriteerien runsas määrä kertoo jo itsessään, että yleisesti hyväksytyjä määritelmiä ei ole ollut käytettävissä (Konrad, 2000). Routimiskriteerit voidaan luokitella mm. seuraavasti: (Koskinen, 1998)

Luokitusominaisuuksiin perustuvat routivuuskriteerit:

- rakeisuus
- konsistenssi
- ominaispinta-ala ja huokosjakauma
- hienoustekijä.

Hydraulisiin ominaisuuksiin perustuvat routivuuskriteerit:

- kapillaarinen nousukorkeus
- vedenläpäisevyys
- vedenpidätyskäyrä.

Routanousukokeisiin perustuvat routivuuskriteerit:

- vakiolämpötilakoe
- vakioroutaantumiskoe.

Chamberlain (1981) jakaa routivuuteen käytettävät kriteerit kolmeen eri tasoon:

- taso I: raekokojakaumaan perustuvat kriteerit
- taso II: raekokojakaumaa täydentävät lisäominaisuudet, kuten konsistenssi, kapillaarisuus ja vedenläpäisevyys
- taso III: laboratoriossa suoritettavat routanousukokeet ja in situ -havainnot.

Taulukko 1 esittää routivuuskriteereitä joidenkin näiden ominaisuuksien mukaan.

Taulukko 1. Routivuuskriteerejä (ISSMFE TC - 8, 1989)

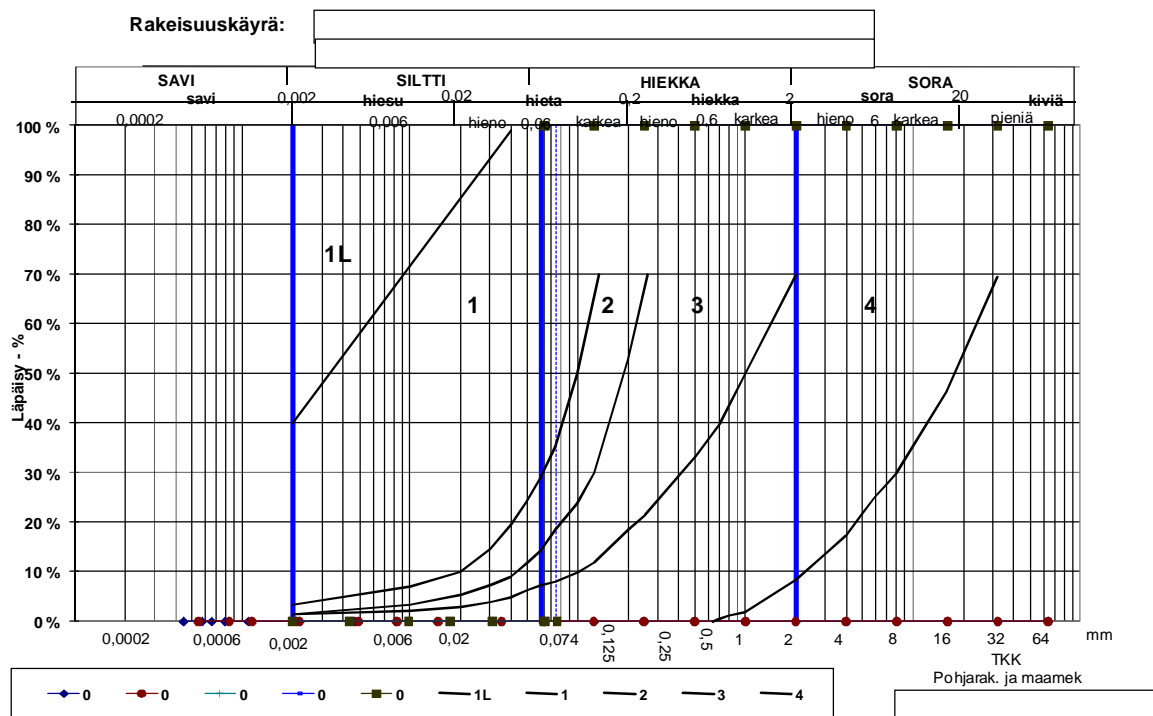
Routi- vuus- luokitus	PLASTISUUSKARTTA		Kapil- laari- suus, m	Juokse- vuuslu- ku I_L	Hie- nouste- kijä R_f	SP(t), mm ² /Kh	Rou- tanou- suno- peus, mm/d
	Maalaji (USCS luoki- tus)	Plastisuus- luku I_p ja juoksuraja w_L					
Routi- maton	GW, GP SW, SP	$I_p < 1$	< 1	≤ 0	$< 2,5$	$< 0,5$	$< 0,5$
Lievästi routiva	CH	$I_p \geq 7$ $w_L > 50$	1,0... 1,5	$< 0,25$	2,5... 5	0,5...1,5	0,5... 2
Keskin- kertai- sesti routiva	CL A-linjan yläp.	$I_p \geq 7$ $w_L = 35...50$	1,5... 2,0	0,25... 0,50	5...10	1,5...3,0	2...4
	OH, MH A-linjan alap.	$I_p \geq 7$ $w_L > 50$					
Erittäin routiva	CL, A-linjan yläp.	$I_p \geq 7$ $w_L < 35$	> 2	$> 0,5$	> 10	$> 3,0$	> 4
	ML, A-linjan alap.	$I_p \leq 4$ $w_L < 50$					
	OL, A-linjan alap.	$I_p \geq 7$ $w_L = 35...50$					

2.2.2 Rakeisuus

Raekokoon perustuvat routivuuden luokittelumenetelmät ovat yleisimmin käytettyjä. Suuri osa näistä menetelmistä perustuu Casagranden vuonna 1931 määrittämään kriteeriin, jonka mukaan maalaji on routivaa, jos se sisältää yli 3 paino-% $< 0,02$ mm lajitetta ja samalla raekokosuhte $D_{60}/D_{10} \geq 15$ tai yli 10 paino-% $0,02$ mm lajitetta raekokosuhteen D_{60}/D_{10} ollessa ≤ 5 (D_{60} on rakeisuuskäyrän 60 prosentin läpäisyarvoa vastaava raekoko ja D_{10} on 10 prosentin läpäisyarvoa vastaava raekoko). (Nieminen, 1987)

Chamberlain (1981) on listannut eri maissa käytettyjä raekokoon perustuvia routivuusluokitteluja. Suomessa rakeisuuteen perustuva luokituskoetehdään rakeisuuskäyrän ja siihen määritettyjen neljän osa-alueen mukaan. Osa-alueiden jako perustuu Casagranden kriteeriin. Alueiden 3 ja 4 rajakäyrällä 3 % maapartikkeleista ovat pienempiä kuin $0,02$ mm ja raekokosuhte on 15. Alueiden 1 ja 2 rajakäyrällä 10 % maapartikkeleista ovat pienempiä kuin $0,02$ mm ja raekokosuhte on 5. Maalajit, joiden rakeisuuskäyrät sijaitsevat alueella 1 ovat routivia. Alueella 1L sijaitsevat maalajit ovat lievästi routivia. Maalajit joiden rakeisuuskäyrät sijaitsevat alueella 2, 3 tai 4 ovat routimattomia, ellei käyrän alaosa leikkaa va-

semmanpuoleista rajakäyrää. Lisäksi alueella 2 sijaitsevien maalajien kapillaarinen nousukorkeus on tarkistettava (ISSMFE TC - 8, 1989). Kuva 1 esittää rakeisuuskäyrää ja siihen määritettyjä alueita.



Kuva 1. Rakeisuuteen perustuva routivuusluokitus

2.2.3 Konsistenssi

Hienorakeisten maiden fysikaalista tilaa pystytään kuvaamaan huonosti tai ei ollenkaan rakenteellisen tiiviyden avulla. Tämän vuoksi on otettu käyttöön käsite konsistenssi (olotila). Hienorakeisilla mailla on kiinteä konsistenssi, plastinen konsistenssi ja juokseva konsistenssi. Konsistenssi on riippuvainen maalajin rakeisuudesta ja vesipitoisuudesta. Konsistenssirajoilla tarkoitetaan maan eri olomuotojen välisiä vesipitoisuusrajoja. (Ravaska, 2009), (GLO-85, 1985)

Plastisen konsistenssin laajuus ilmaistaan konsistenssirajojen erotuksena eli plastisuusluku (2-1):

$$I_p = w_L - w_p \quad (2-1)$$

jossa I_p on plastisuusluku
 w_L juoksuraja
 w_p plastisuusraja

Plastisuusraja määritetään kierityskokeella ja juoksuraja Casagranden koputuskojeella tai kartiokokeella. Konsistenssirajoista voidaan määrittää juoksevuusluku (2-2):

$$I_L = \frac{w - w_p}{I_p} \quad (2-2)$$

Konsistenssirajojen avulla voidaan arvioida maalajin routivuutta taulukossa 1 esitettyjen raja-arvojen mukaan.

2.2.4 Hienoustekijä

Hienoustekijä sisältää epäsuorasti maa-aineksen ominaispinta-alan ja mineralogian vaikutuksen maalajin routivuuteen. Hienoustekijä lasketaan kaavasta (2-3): (ISSMFE TC - 8, 1989)

$$R_f = \frac{(\text{hienoaainespitoisuus}) \cdot (\text{savipitoisuus})}{(\text{juoksuraja})} \quad (2-3)$$

Hienoustekijää on ehdotettu käytettäväksi routivuuskriteerinä maa-aineksille, jotka ovat rakeisuudeltaan hienon ja karkean välissä. Menetelmän toimivuus on vahvistettu ainoastaan maa-aineksille, joiden alle 0,074 mm partikkelien osuus on ≤ 20 %. Kokemukset menetelmän käytöstä ovat varsin rajalliset. Hienoustekijään perustuvat routivuuskriteerit on esitetty taulukossa 1. (ISSMFE TC - 8, 1989)

2.2.5 Kapillaarinen nousukorkeus

Maalajin routivuutta voidaan arvioida sen kapillaarisen nousukorkeuden mukaan. Kapillaarikoe suoritetaan sitä varten suunnitellulla laitteella ja testituloksiin vaikuttavat:

- maa-aineksen maksimi raekoko
- näytteen halkaisija
- testimenettely
- näytteen tiivistys.

Kapillaarikokeen koejärjestelyjä on kuvattu mm. lähteessä GLO-85, Geotekniset laboratorio-ohjeet. Kapillaariseen nousukorkeuteen perustuva routivuusluokittelu on esitetty taulukossa 1.

2.2.6 Routanousukokeet

Taulukossa 1 on esitetty myös routanousukokeiden tuloksiin perustuvia routivuusluokitteluja. SP(t) on maalajille ominainen segregatiopotentiaali ja se kuvaa maalajin taipumusta routimiseen. Segregatiopotentiaali perustuu Konradin & Morgensternin (1981) kehittämään routimisteoriaan ja se on määritelty tarkemmin kappaleessa 4.1.

Taulukossa 1 annetaan myös routimiskriteerit routanousunopeuden mukaan. Taulukon arvot perustuvat United States Army Corps of Engineers Cold Regions Research and Engineering Laboratoryn (CRREL) työhön. Chamberlain (1981) kuvaa laitteistoa jolla routanousunopeudet määritetään. Taulukossa 1 esitetyt routanousunopeuden raja-arvot perustuvat vakioroutaantumisenopeuden tuottamaan routanousuun. Routanousunopeus määritellään 48 ja 78 jäädytystunnin välillä havaitun routanousun mukaan, kun routaantumisenopeus on noin 13 mm/d.

2.3 Maan lämpötekniset ominaisuudet

2.3.1 Yleistä

Maan lämpötekniisiä ominaisuuksia ovat lämmönjohtavuus, ominaislämpö, tilavuuslämpökapasiteetti ja tilavuusyksikköä kohti vapautuva tai sitoutuva olomuodonmuutoslämpö (Helander, 1986). Niitä voidaan käyttää maan jäätymisestä aiheutuvan kokonaisnousun eli routanousun laskemiseen yhdessä jäljempänä määriteltävän routimiskertoimen kanssa (Friberg & Slunga, 1989). Tämän lisäksi niitä voidaan myös hyödyntää roudan syvyyden laskennassa (VTT Yhdyskuntatekniikka, 2007).

2.3.2 Lämmönjohtavuus

Maan lämmönjohtavuus on riippuvainen useista eri tekijöistä. Siihen vaikuttavat mm. tiheys, vesipitoisuus, lämpötila, mikrorakenne eli komponenttien tilavuusominaisuudet ja mikrogeometria sekä mineraalikoostumus (Kersten, 1952). Hienorakeisen ja karkearakeisen maan lämmönjohtavuudelle on määritetty kokeelliset kaavat sulassa ja jäätyneessä tilassa kuivatilavuuspainon ja vesipitoisuuden perusteella (Helander, 1986).

Jäätyneen maan lämmönjohtavuus lasketaan kaavan (2-4) mukaan:

$$\lambda_f = a \cdot 10^{b\rho_d} + c \cdot 10^{d\rho_d} \cdot w \quad (2-4)$$

jossa	λ_f on	jäätyneen maan lämmönjohtavuus, [W/mK]
	ρ_d	kuivavirtotiheys, [10^3 kg/m ³]
	w	vesipitoisuus, [%]

a, b, c, d	vakioita			
	hienorakeinen maa:		karkearakeinen maa:	
	a = 0,0014	b = 1,4	a = 0,011	b = 0,81
	c = 0,012	d = 0,50	c = 0,0046	d = 0,91

Sulan maan lämmönjohtavuus lasketaan kaavan (2-5) mukaan:

$$\lambda_u = (\alpha \cdot \log w + \beta) \cdot 10^{0,62 \cdot \rho_d} \quad (2-5)$$

jossa λ_u on	sulan maan lämmönjohtavuus, [W/mK]			
α, β	vakioita			
	hienorakeinen maa		karkearakeinen maa	
	$\alpha = 0,13$	$\beta = -0,029$	$\alpha = 0,10$	$\beta = 0,058$

Kaavat (2-4) ja (2-5) ovat Kerstenin (1949) kokeellisesti määrittämiä. Kaavat eivät kuitenkaan ota huomioon jäätymättömän veden määrää. Routanousulaskelmissa käytettävä lämmönjohtavuuden arvo määritetään kaavojen (2-4) ja (2-5) avulla kaavasta (2-6): (Friberg & Slunga, 1989).

$$\lambda_l = \lambda_f + (\lambda_u - \lambda_f) \cdot \frac{w_u}{w} \quad (2-6)$$

jossa λ_l on	lämmönjohtavuuden laskenta-arvo, [W/mK]
λ_f	jäätyneen maan lämmönjohtavuus, [W/mK]
λ_u	sulan maan lämmönjohtavuus, [W/mK]
w_u	jäätyneessä maassa sulana pysyvä veden määrä, [%]
w	vesipitoisuus, [%]

Jäätymättömänä pysyvän veden määrä on riippuvainen lämpötilasta, paineesta ja useista fysikaaliskemiallisista ominaisuuksista. Jäätymättömän veden määrää voidaan arvioida erilaisilla empiirisillä kaavoilla, ydinmagneettisella resonanssilla (nuclear magnetic resonance NMR) tai differentiaalisella pyyhkäisykalorimetrialla (differential scanning calorimetry DSC). (Kujala, 1991)

2.3.3 Ominaislämpö

Ominaislämpö (2-7) ilmaisee sen lämpömäärän, joka tarvitaan muuttamaan tietyn aineen lämpötilaa yksikön verran massayksikköä kohti.

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (2-7)$$

jossa	c on	ominaislämpö, [J/kgK]
	Q	lämpömäärä, [J]
	m	massa, [kg]
	T	lämpötila, [K]

2.3.4 Tilavuuslämpökapasiteetti

Tilavuuslämpökapasiteetti ilmaisee sen lämpömäärän, joka tarvitaan muuttamaan tietyn aineen lämpötilaa yksikön verran tilavuusyksikköä kohti. (Kersten, 1952). Tilavuuslämpökapasiteetti määritetään kaavoilla (2-8) ja (2-9):

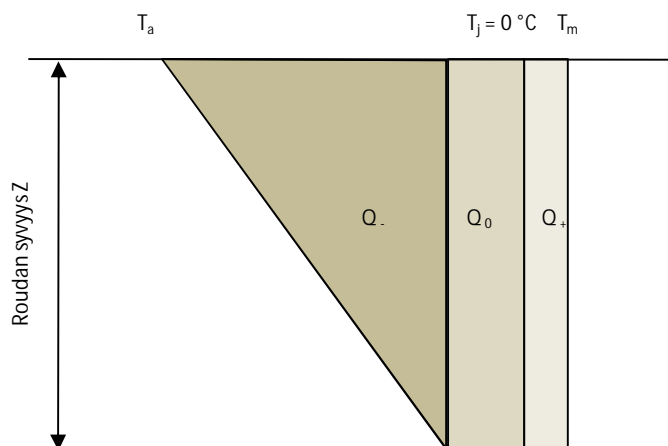
$$C_u = \frac{\rho_d}{\rho_w} \cdot (0,18 + 1,0 \cdot \frac{w}{100}) \cdot C_w \quad (2-8)$$

$$C_f = \frac{\rho_d}{\rho_w} \cdot (0,18 + 0,5 \cdot \frac{w}{100}) \cdot C_w \quad (2-9)$$

joissa	C _u on	tilavuuslämpökapasiteetti sulana, [Wh/m³K]
	C _f	tilavuuslämpökapasiteetti jäätyneenä, [Wh/m³K]
	C _w	veden tilavuuslämpökapasiteetti, 1163 Wh/m³K
	ρ _d	kuivairtitiheys, [kg/m³]
	ρ _w	veden tiheys, 1000 kg/m³

2.3.5 Olomuodonmuutoslämpö

Olomuodonmuutoslämpö käsittää maan termisessä analyysissä maan jäätyessä vapautuvan ja sulaessa sitoutuvan lämpömäärän (Helander, 1986). Kun routa on tunkeutunut syvyyteen Z ajassa t, on lämpötilaprofiili kuvan 2 mukainen.



Kuva 2. Lämpötilan jakautuminen maan jäätyessä (VTT Yhdyskuntatekniikka, 2007)

Kuvan oikeassa laidassa oleva suorakaide edustaa maan jäähtymislämpöä (Q_+), kun maa jäähtyy lähtöhetken lämpötilasta T_m (vuoden keskilämpötila) nolnaan asteeseen. Kuvan keskellä oleva tummempi suorakaide edustaa maassa olevan veden olomuodonmuutoslämpöä Q_0 ja vasemmalla oleva kolmio esittää rakenteen jäähtymislämpöä (Q_-) maan pintalämmön laskiessa nollasta asteesta T_a :han (pakkaskauden keskilämpötila). Lämpömäärät voidaan esittää kaavojen (2-10) – (2-12) mukaan: (VTT Yhdyskuntatekniikka, 2007)

$$Q_+ = C_u \cdot T_m \cdot Z \quad (2-10)$$

$$Q_0 = w \cdot \rho_d \cdot q_j \cdot Z \quad (2-11)$$

$$Q_- = 0,5 \cdot C_f \cdot |T_a| \cdot Z \quad (2-12)$$

joissa	Z on	roudan syvyys, [m]
	C_u	tilavuuslämpökapasiteetti sulana, [Wh/m ³ K]
	C_f	tilavuuslämpökapasiteetti jäätyneenä, [Wh/m ³ K]
	T_m	vuoden keskilämpötila, [°C]
	T_a	pakkaskauden keskilämpötila, [°C]
	w	vesipitoisuus, [%]
	ρ_d	maan kuivairtitiheys, [kg/m ³]
	q_j	veden jäähtymislämpö, 93 Wh/kg

Kun routa on tunkeutunut syvyyteen Z , on jäätyneestä maasta vapautunut lämpömäärä:

$$q \cdot Z = Q = Q_+ + Q_0 + Q_- \quad (2-13)$$

Yhdistämällä kaavat (2-10) – (2-13) saadaan kaava (2-14) olomuodonmuutoslämmölle:

$$q = C_u \cdot T_m + w \cdot \rho_d \cdot q_j + 0,5 \cdot C_f \cdot |T_a| \quad (2-14)$$

jossa q on olomuodonmuutoslämpö, [Wh/m³]

Yhtälöissä (2-12) ja (2-14) esiintyvä pakkaskauden keskilämpötila lasketaan kaavasta (2-15):

$$T_a = -\frac{F_{mit}}{t} \quad (2-15)$$

jossa T_a on pakkaskauden keskilämpötila, [°C]
 F_{mit} mitoituspakkasmäärä, [Kh]
 t pakkaskauden kesto, [h].

Talven pakkasmäärä lasketaan ilman vuorokautisista keskilämpötiloista. Pakkasmäärä riippuu talven ankaruudesta ja saattaa vaihdella huomattavasti eri vuosina. Tilastolliset pakkasmäärät on laskettu Ilmatieteen laitoksen säähavainnosta jaksolta 1961-1990. Kerran kahdessa vuodessa toistuva pakkasmäärä ilmoitetaan arvona F_2 . Kerran viidessä vuodessa, 10 vuodessa, 20 vuodessa ja 50 vuodessa toistuvat pakkasmäärät ilmoitetaan arvoina F_5 , F_{10} , F_{20} ja F_{50} . Suomessa esiintyvät pakkasmäärät on esitetty mm. Talonrakennuksen routasuojausohjeissa. Routasuojausmitoituksessa (talonrakennus) tai routanousulaskelmissa (tiehankkeet) käytettävä mitoituspakkasmäärä valitaan tapauskohtaisesti kohteen sijainnin ja käyttötarkoituksen mukaan.

2.3.6 Roudan syvyyden laskenta

Roudan syvyyteen vaikuttavia tekijöitä ovat: (VTT Yhdyskuntatekniikka, 2007)

- maalaji (lämmönjohtavuus, lämpökapasiteetti, vesipitoisuus)
- ilmasto (pakkasmäärä, vuoden keskilämpötila, lumikerroksen paksuus)
- maan pintakasvillisuus ja topografia
- rakennus ja perustusten rakenne.

Roudan syvyyden laskentamenettely on esitetty mm. VTT:n Talonrakennuksen routasuojausohjeissa. Roudan syvyys voidaan laskea kuvassa 2 esitettyjen lämpömärien, lämmönjohtavuuden ja pakkasmäärän mukaan kaavalla (2-16):

$$Z = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot F}{q}} \quad (2-16)$$

Roudan syvyyttä voidaan arvioida myös empiirisillä laskentakaavoilla. Empiiriset menetelmät ovat tiiviisti sidoksissa ympäristö- ja pohjasuhteisiin, joissa ne on kehitetty eikä niillä näin ollen ole välttämättä yleispätevyyttä. Suomessa yleisesti käytetyn menetelmän mukaan lumesta ja kasvillisuudesta paljailla mailla roudan syvyyttä voidaan arvioida talven pakkasmäärän neliöjuuren ja maasta riippuvan kertoimen avulla yhtälöllä (2-17). (Kujala, 1994)

$$Z = k \cdot \sqrt{F} \quad (2-17)$$

jossa k on maalajista riippuva kerroin [$\text{m}/(\text{Kh})^{0.5}$]
 Z roudan syvyys [m]

Yhtälöstä (2-16) erotettu kerroin $(2\lambda/q)^{0.5}$ on siis oletettu yhtälössä (2-17) maalajista riippuvaksi vakioksi. Vakio k ilmaistaan yleensä ilman yksikköä ja sille käytetään arvoja 8...12.

2.4 Routanousu

2.4.1 Veden osuus jäätyvässä maassa

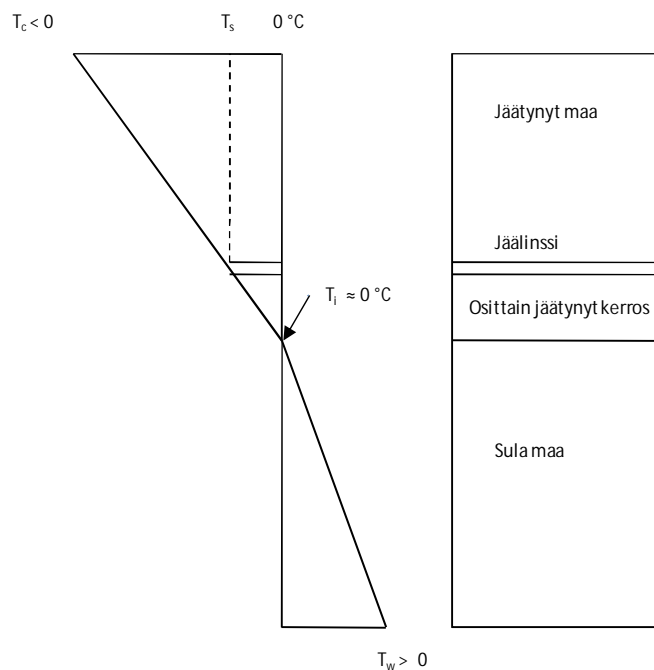
Tutkimuksissa on osoitettu, että hienorakeista maata jäädytettäessä kaikki sen sisältämä vesi ei jäädy nollassa asteessa. Jäätynyt maa on seos kiinteitä aineita, nesteitä ja kaasuja, koostuen pääosin kiinteistä mineraalipartikkeleista, jäästä, vedestä sitoutuneesta ja nestemäisessä tilassa sekä kaasuista. Routiminen on riippuvainen maassa tapahtuvasta veden kulkeutumisesta ja jäätymisestä, sekä veden sidoksista maapartikkeleihin erilaisin kemiallisin ja sähköstaattisin voimin. Ensin jäätyy sitoutumaton, suurissa huokosissa oleva vesi ja vähitellen lämpötilan laskiessa jäätyy lujemmin sitoutunut vesi (Aittomäki, 1986). Kosteutta alkaa virrata jäätyvään maakerrokseen sulista maakerroksista. Veden kulkeutuminen yhdistettynä lämpövirtaukseen saa aikaan monimutkaisen fysikaalisen ilmiön, jota routanousuteorioilla pyritään selittämään. Hienorakeiset maapartikkelit ja niihin sitoutunut vesi ovat merkittävässä asemassa routimisen kannalta. Savissa esiintyy huomattavia määriä jäätymätöntä vettä jopa $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötiloissa, kun taas silteissä suurin osa huokosvedestä jäätyy hieman nollan asteen alapuolella. (Konrad & Morgenstern, 1980)

Jäätynyt maakerros siis sisältää myös nestemäisessä tilassa olevaa vettä ja on näin ollen vedellä kyllästynyt. Jäätyneen maan sisältämä nestemäisessä muodossa oleva vesi on joh-

tanut oletukseen nk. osittain jäätyneestä kerroksesta (frozen fringe). Osittain jäätynyt kerros on vettä läpäisevä ja säätelee veden virtausta jäälinsseen. (Kujala, 1991)

2.4.2 Lämpötilaolosuhteet maan jäätyessä

Jäälinsin muodostumisen aikana vaikuttavat lämpötilaolosuhteet on esitetty alla (kuva 3). T_s (segregational-freezing temperature) kuvaa lämpötilaa kasvavan jäälinsin pohjassa. Suurin lämpötila, jossa maan huokosiin voi muodostua jäätä, on esitetty arvona T_i (in situ freezing temperature). Osittain jäätynyt kerros millä tahansa maalajilla sijaitsee isotermien T_s ja T_i välissä. Laboratoriossa suoritettavissa koeolosuhteissa jäälinssi muodostuu ja kasvaa koko maanäytteen poikkipinta-alan kokoiseksi. Tutkimuksissa on osoitettu muodostuneen jäälinsin pysäyttävän veden kulkeutumisen pidemmälle jäätyneeseen maakerrokseen. Tämän lisäksi laboratoriokokeista saadut tiedot tukevat näkökulmaa, että virtaus osittain jäätyneen kerroksen yli on jatkuvaa, eikä vettä pääse kerääntymään siihen. Routanousukoikeissa havaittu jäälinsin paksuus ja routarajalle virranneen veden määrä korreloivat voimakkaasti keskenään. (Konrad & Morgenstern, 1980)



Kuva 3. Lämpötilaolosuhteet maan jäätyessä (Konrad & Morgenstern, 1980)

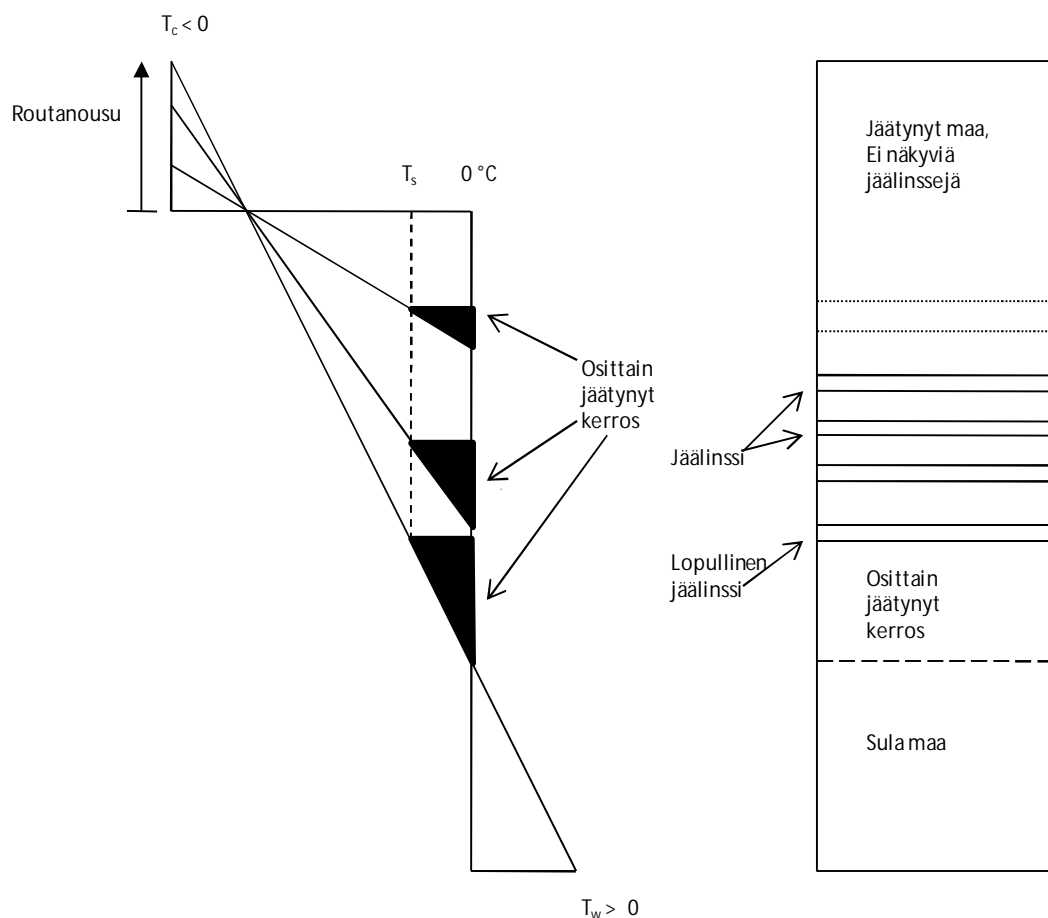
Jäätyvä maanäyte voidaan jakaa kahteen osaan: passiiviseen systeemiin, koostuen jäätyneestä maasta lämpötilojen T_c ja T_s välissä, ja aktiiviseen systeemiin, koostuen osittain jäätyneestä kerroksesta ja sulasta maasta. Passiivisessa osassa kosteuden siirtymät ovat hyvin pieniä johtuen jäätyneen maan alhaisesta vedenläpäisevyydestä. Passiivisesta osasta tulevan kosteuden osuus kasvavassa jäälinsissä, ja näin ollen kokonaisroutanousussa, on osoittautunut sekä laboratoriotutkimuksissa että kenttähavainnoissa häviävän pieneksi. (Konrad & Morgenstern, 1980)

2.4.3 Jäälänssin muodostumisen mekanismi

Jäätymisen alussa routarintama etenee nopeasti syvemmälle maan sisään. Etenevään routarintamaan kulkeutuva vesi päätyy vyöhykkeisiin, joiden paikat määräytyvät maalajin paikallisten vedenläpäisevyyksien mukaan. Kulkeutunut vesi vahvistaa maapartikkeleita ympäröiviä ohuita, jäätymättömänä pysyviä vesikerroksia. Tämä puolestaan johtaa systeemin termodynaamisen tasapainotilan häiriintymiseen, joka korjaantuu siten, että osa vedestä jäätyy. Toisin sanoen maapartikkeleita ympäröivän vapaan vesikerroksen paksuus pysyy vakiona tietyssä lämpötilassa, sillä sinne virtaava uusi vesi jäätyy. Nopeasti etenevä routarintama ei mahdollista kovin suurta veden keräytymistä yhdelle tasolle, ja näin ollen estää yhtenäisen jäälänssin muodostumisen. (Konrad & Morgenstern, 1980)

Routarintaman liikkeessä routanousu on pientä ja muodostuneeseen huokosjäämatriisiin kohdistuvat rasitukset ovat pieniä. Routarintaman etenemisen hidastuessa myös lämpötilamuutokset maanäytteen sisällä hidastuvat. Tämä puolestaan pidentää aikaa, jona vesi voi keräytyä yhdelle tasolle. Huokosjäähän alkaa kohdistua yhä suurempia rasituksia veden kertyessä samalle tasolle johtaen lopulta huokosjäämatriisin murtumiseen. Murtokohtaan keräytyvä ja sinne jäätyvä vesi muodostaa yhtenäisen jäälänssin. Muodostunut jäälänssi on vapaa sisäisistä rasituksista ja se kasvaa maapartikkelien, jäätymättömän veden ja huokosjään muodostamalle, lähes tasaiselle alustalle. (Konrad & Morgenstern, 1980)

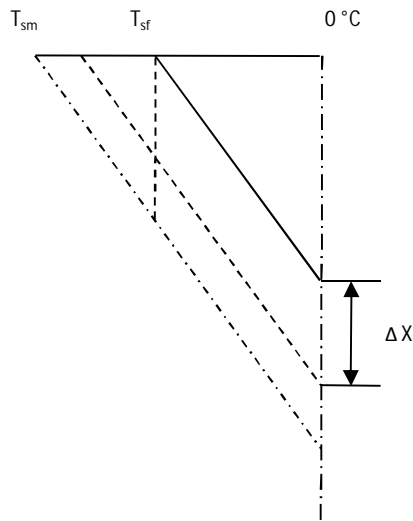
Maanäytteeseen muodostuu useita jäälänssejä routarintaman etenemisen hidastuessa. Routarintama kuitenkin etenee niin kauan, kun lämpötilaprofiilissa tapahtuu muutoksia. Kuva 4 esittää routarintaman etenemistä maanäytteessä.



Kuva 4. Kaavakuva jäälinssien muodostumisesta (Konrad & Morgenstern, 1980)

Tarkastellaan ajanhetkeä t , jolloin useampia jäälinssiä on jo muodostunut maanäytteeneseen. Kyseisellä ajanhetkellä uusi jäälinssi on muodostumassa ja sen alapinnan lämpötila on T_{sf} . Lämpövirtausta esiintyy vielä näytteessä, joten routarintama etenee syvemmälle näytteen nopeudella dX/dt . Tämä puolestaan johtaa muutoksiin näytteen lämpötilaprofiilissa ja erityisesti sen hetkisen osittain jäätyneen kerroksen lämpötilaprofiilissa. Ajanjaksolla Δt jäälinssin pohjan lämpötila laskee lämpötilan T_{sf} alapuolelle. Toisin sanoen olemassa oleva osittain jäätynyt kerros paksuuntuu ja sen pintojen välinen lämpötilaero kasvaa. Osittain jäätyneen kerroksen kylmetessä sen sisältämä vapaa vesi jäätyy ja näin ollen sen vedenläpäisevyys heikkenee. Niin kauan kuin vesi pääsee tunkeutumaan osittain jäätyneen kerroksen läpi, sen yläpuolella sijaitseva jäälinssi kasvaa. Routarintaman eteneminen johtaa yhä kylmempiin lämpötiloihin osittain jäätyneen kerroksen pinnassa, kunnes pinta saavuttaa lämpötilan T_{sm} . Tässä lämpötilassa osittain jäätyneen kerroksen yläpinnan vedenläpäisevyys on niin pieni, että veden virtaus jäälinssiin käytännöllisesti katsoen lakkaa. Vettä alkaa nyt kertyä jonnekin edellisen jäälinssin alapuolelle. Uuden kertymäkohdan määrittää sen hetkessä osittain jäätyneessä kerroksessa vaikuttava vedenläpäisevyys. Tämä prosessi toistuu niin kauan kunnes routarintama pysähtyy ja lopullisen jäälinssin muodostuminen

alkaa. Kuva 5 esittää osittain jäätyneen kerroksen lämpötilaprofiilin muutosta routarintaman edetessä. (Konrad & Morgenstern, 1980)



Kuva 5. Osittain jäätyneen kerroksen lämpötilaprofiili (Konrad & Morgenstern, 1980)

Edellä kuvattu prosessi johtaa kuvassa 4 esitettyyn tilanteeseen, jossa maanäytteen yläpinnassa ei ole silmin havaittavia jäälinsskejä routarintaman nopean etenemisen takia. Routarintaman etenemisen hidastuessa alkaa esiintyä ohuita jäälinsskejä. Niiden pystysuuntainen etäisyys toisistaan on melko pieni johtuen niiden muodostumisen aikana vaikuttaneesta suuresta lämpötilagradientista. Ajan kuluessa lämpötilagradientti kuitenkin pienenee routarintaman etenemisen hidastumisen myötä ja osittain jäätyneen kerroksen paksuus kasvaa. Jäälinssit myös kasvavat paksummiksi ja ne ovat etäämmällä toisistaan. Routarintaman pysähtyessä osittain jäätynyt kerros saavuttaa suurimman paksuutensa. Tilaa jossa maanäytteen lämpötilaprofiilissa ei enää tapahdu muutoksia kutsutaan stabiiliksi tilaksi (steady state). (Konrad & Morgenstern, 1980)

3. YLEISESTI KÄYTETTYJÄ ROUTANOUSUKOELAITTEISTOJA

Suomessa toiminnassa olevia routanousukoelaitteistoja on ainakin Valtion Teknillisessä Tutkimuskeskuksessa (VTT), Tampereen Teknillisessä Yliopistossa (TTY), Oulun yliopistossa ja Ramboll Finland Oy:ssä. Onninen (2001) kuvaa VTT:n laitteiston toimintaa läheteessä ”Menetelmäkuvaus TPPT 6”. Nurmikolu (2005) esittelee TTY:llä käytetyn rengas-sellin väitöskirjassaan. Kujala (1991) puolestaan kuvaa Oulun yliopistossa käytössä olevaa laitteistoa väitöskirjassaan ja Lahtinen (2001) kuvaa Ramboll Finland Oy:n käytössä olevaa laitteistoa väitöskirjassaan. Oulun yliopiston ja TTY:n käytössä olevien laitteistojen kitkanhallinta perustuu sellirakenteen rengasjakoon, kun taas VTT:n ja Ramboll Finlandin laitteistot hyödyntävät sellimateriaalin alhaista kitkaa.

Euroopassa käytettyjen routanousukoelaitteiden eroavaisuuksia on kartoitettu kansainvälisessä työryhmässä CEN TC 227, Working Group 4, Task Group 5 – Frost susceptibility. Taulukkoon 2 on koottu eurooppalaisten laitteistojen ominaisuuksia. Taulukko on joiltain osin puutteellinen, mutta siitä käy kuitenkin ilmi koelaitteiden suuri kirjo.

Taulukko 2. Euroopassa ja USA:ssa käytettyjä routanousukoelaitteistoja (Horvli, 2008)

Method designation	CRREL ^{1), 2)}	TRRL ^{1), 2)}	LCPC ²⁾	Austria	Switzerland	UNH ³⁾	LHRI ²⁾	VTT ³⁾	VTT	NTNU, Slight mod of CRREL	NGI, Advanced FHC, Multiple procedures possible
Standard no.		BS 812-124:1989	AFNOR NF P 98-234-2 Jan 1996	ÖNORM B 4810	SN 670 321a				TPPT-R07	-	-
Country where the method is developed and described	USA	UK	FR	AU	ZE	USA	Russia	SE	FI	NO	NO
Specimen height (mm)	152	152	320	150	127	152	80-100	580 ³⁾	150-200	150	150
Specimen diam. (mm)	143	102	150	150	158	137	100	122	100	150	150
Side friction control	Plexiglas	Waxed paper	Lubricated rubber	Multi-ring	Epoxy, conic	Multi-ring	Multi-ring	Multi-ring		Multi-ring	
Number of temp. indicators	5 ²⁾	4	?	3	?	?	?	5 ²⁾	3	5	2*99
Temperature Top, (°C)	Variable ⁴⁾	-17	-5,7	(Not given)?	-7,5	-4	-5	*	-3	-4	
Temperature Bottom, (°C)	3	4	1 or 2	(Not given)?	1,5	25 (at start)	(Not given)	4-6	1	4	
Frost pen velocity, (mm/day)	Constant 5-20	Variable	Variable	1.step:Const fp 2.step const T	Variable?	Variable 80-180	12-15	(Not given)	Variable	-	Variable
Vertical load, (kPa)	3,5	0	0		1,4	3,5	Variable (0 - 9)	Variable	2-20-40-40 f-thaw-f-thaw	Variable	Variable
Testing time, (hours)	288	250	150-200	48 const f.vel. + 36 const T	24 freezing 24 thawing	12	192-216	400	Min 24 hr freezing periods	288	
Interpretation parameters / Criteria	Frost heave/day	Total frost heave	Frost heave /√ Frost index (mm/√°C *h)	Mineral criteria in comb with frost heave	-Frost heave -CBR thawed	Frost heave/day	% Frost heave	Frost heave /√ Frost index (mm/√°C *h)	-Frost heave -Frost H. ratio -FH coeff: SP -Thaw settem.	Frost heave/day	
Classification system			NF P11-300						Ref ISSMFE, T8, 1989		

Joissain maissa suoritettavat routanousukokeet ovat standardoituja. Kaikki maat eivät kuitenkaan käytä samaa fysikaalista mallia kokeiden tulosten tulkintaan. Tämä hankaloittaa eri ”koulukunnissa” määritettyjen tulosten vertailtavuutta. Lisäksi koelaitteistot eroavat toisistaan useissa suhteissa. Eroja löytyy rakenteista, testikäytännöistä, näytteen valmisteluista sekä kokeen perusteella määritellyistä routivuusominaisuuksista.

Laitteistot ovat fyysisesti erikokoisia ja kokeiden aikana käytetyt lämpötilojen raja-arvot vaihtelevat. Kaikki eivät myöskään käytä vakioämpötiloja, vaan pyrkivät vakioimaan routan tunkeutumisnopeuden. Suomessa yleisesti käytettyä routimiskerrointa ei suinkaan ilmoiteta kokeen tuloksena kaikkialla, vaan tuloksiksi annetaan mm. routanousu päivässä, kokonaisroutanousu tai suhteellinen routanousu. Routasellin ja näytteen välinen kitkanhallinta perustuu lähes kaikissa laitteissa sellin rengasjakoon tai sellimateriaalin alhaiseen kitkaan.

Routanousukoelaitteita on yllä esitetyn taulukon lisäksi mm. Saksassa ja Japanissa. Kuva 6 esittää Saksassa käytettyä routaselliä. Saksalainen routaselli on sisähalkaisijaltaan 150 mm ja koostuu viidestä 25 mm korkeasta teflonrenkaasta. Lämpötiloja mitataan näytteen pohjasta, pinnasta sekä kyljestä.



Kuva 6. BAST laboratorion (Saksa) Teflonista valmistettu rengasselli (Kuva: Seppo Saarelainen)

4. LASKENTAMALLI

4.1 Segregaatiopotentiaali

Maaperän routivuus on ilmiönä monimutkainen ja useat sen selittämiseen käytetyt fysikaaliset mallit ovat olleet pitkään puutteellisia. Selitys veden kulkeutumiselle routivaan maakerrokseen on keskeinen lähtökohta tutkittaessa routanousuilmiötä. Hallitsevaksi ja laajalti käyttöönotetuksi teoriaksi on kuitenkin 1980-luvulta lähtien noussut Konradin ja Morgensternin (1981) kehittämä segregaatiopotentiaali-teoria (Saarelainen, 1986). Perusolettamus teorian takana on, että veden virtausnopeus jäälínssin kasvaessa on suoraan verrannollinen osittain jäätyneen maakerroksen lämpötilagradienttiin kaavan (4-1) mukaan. Kerroin $SP(t)$ kuvaa maalajin taipumusta routimiseen (Konrad & Morgenstern, 1981).

$$v_w = SP(t) \cdot gradT_f(t) \quad (4-1)$$

jossa	v_w on	veden virtausnopeus jäälínssiin, [m/h]
	$SP(t)$	segregaatiopotentiaali, [m ² /Kh]
	$gradT_f(t)$	osittain jäätyneen kerroksen lämpötilagradientti, [K/m]

Segregaatiopotentiaalin määrittäminen laboratorio-olosuhteissa on mahdollista. Lämpötilagradientin määrittäminen osittain jäätyneestä kerroksesta kuitenkin vaatii erittäin hienostunutta lämpötilojen mittausjärjestelmää. Maastossa segregaatiopotentiaalin määrittäminen on kuitenkin hankalaa.

Maanäytteeseen kulkeutuva vesi jäätyy muodostaen huokosjäää tai jäälínssin. Yksidimensionaalisen tilavuudenmuutoksen nopeus jäätyvässä ja vedellä kyllästyneessä maassa voidaan laskea kaavan (4-2) mukaan:

$$h(t) = \frac{\rho_w}{\rho_i} \cdot v_w = 1,09 \cdot v_w \quad (4-2)$$

jossa	$h(t)$ on	routanousunopeus, [m/h]
	ρ_w	veden tiheys, [kg/m ³]
	ρ_i	jään tiheys, [kg/m ³]
	v_w	veden virtausnopeus jäälínssiin, [m/h]

Yhdistämällä kaavat (4-1) ja (4-2) saadaan laskukaava (4-3) segregaatiopotentiaalille routanousunopeuden funktiona:

$$SP(t) = \frac{1}{1,09} \cdot \frac{h(t)}{gradT_f(t)} \quad (4-3)$$

Maalajin segregatiopotentialia voidaan myös arvioida epäsuorasti maanäytteelle tehdyistä rutiininomaisista luokituskokeista. Segregatiopotentialin on havaittu korreloivan mm. hienoaineslajitteen keskimääräisen raekoon, ominaispinta-alan sekä vesipitoisuuden ja juoksurajan suhteen kanssa. (Konrad, 2000)

4.2 Routimiskerroin

Suomessa käytetään yleisesti routanousun kuvaamiseen segregatiopotentialin sijasta routimiskerrointa (Saarelainen, 1992), (Onninen, 2001), (Nurmikolu, 2005). Routimiskertoimen (frost heave coefficient) ja segregatiopotentialin (segregation potential) pääasiallinen ero on, että veden virtausnopeuden mukaan laskettu segregatiopotentiali ei ota huomioon veden jäätyminen aiheuttamaa 9 % tilavuudenkasvua. Segregatiopotentialissa lämpötilagradientti määritetään routarajalla osittain jäätyneestä kerroksesta, kun taas routimiskertoimen lämpötilagradientti määritetään koko jäätyneestä kerroksesta. Routimiskerroin (4-4) on routanousunopeuden ja jäätyneen maakerroksen lämpötilagradientin suhde. (Nurmikolu, 2005)

$$SP_0 = \frac{v}{gradT} = \frac{\Delta h \cdot Z_j}{\Delta t \cdot (0^\circ C - T_-)} \quad (4-4)$$

jossa	SP_0 on	routimiskerroin [mm^2/Kh]
	Δh	routanousun muutos mittausvälin aikana [mm]
	Δt	em. routanousun muutosta vastaava aikaväli tunteina [h]
	T_-	maan pinnan lämpötila [$^\circ C$]
	Z_j	routan syvyys (jäätyneen näytteenosan korkeus) [mm]
	v	routanousunopeus [mm/h]

Tässä tutkimuksessa testatuista maa-aineksista määritettiin routimiskerroin yllä esitetyn kaavan mukaan. Routimiskerroin soveltuu myös käytettäväksi maastotutkimuksissa segregatiopotentialia paremmin, sillä lämpötilagradientti voidaan laskea maan pinnan lämpötilan ja routan syvyyden mukaan.

Routimiskerroin on myös riippuvainen maassa vallitsevista jännityksistä. Laboratoriokokeissa saatavat tulokset ovat siis riippuvaisia testattavaan maanäytteeseen kohdistuvasta kuormituksesta. SP_0 :ssa alaindeksi 0 kuvaa kokeen kuormittamatonta luonnetta. Tässä tutkimuksessa maanäytteeseen kohdistuva kuorma muodostui ainoastaan välttämättömistä koelaitteiston osista ja oli suuruudeltaan 2,4 kPa.

4.3 Muut routanousukokeesta määritettävät suureet

Kaavan (4-4) mukaisen routimiskertoimen määrittämiseksi täytyy routanousukokeesta ensin määrittää alla kuvatut suureet. (Onninen, 2001), (Nurmikolu, 2005)

Laboratoriokokeissa roudan syvyys (Z_j) määritetään interpoloimalla routaraja routasellin kylkeen sijoitettujen lämpötila-anturien antamien tietojen perusteella. Roudan syvyys (4-5) on näytteen alkukorkeuden ja routanousun summa vähennettynä sulan näytteenosan korkeudella:

$$Z_j = H + h - Z_s \quad (4-5)$$

jossa	Z_j on	roudan syvyys (jäätyneen näytteenosan korkeus), [mm]
	H	näytteen alkukorkeus, [mm]
	h	routanousu tai sulamiskokoonpuristuma, [mm]
	Z_s	sulan näytteenosan korkeus, [mm]

Routanousunopeus (v) on routanousun muutoksen suhde mittausväliin (4-6):

$$v = \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (4-6)$$

jossa	v on	routanousunopeus [mm/h]
	Δh	routanousun muutos mittausvälin aikana [mm]
	Δt	mittausväli [h]

Lämpötilagradientti ($gradT$) on routarajan ja jäätyneen pinnan välisen lämpötilaeron suhde jäätyneen kerroksen paksuuteen (4-7):

$$gradT = \frac{0^\circ C - T_-}{Z_j} \quad (4-7)$$

jossa	$gradT$ on	lämpötilagradientti jäätyneessä kerroksessa [$^\circ C/mm$]
	T_-	näytteen pinnan lämpötila [$^\circ C$]
	Z_j	roudan syvyys (jäätyneen näytteenosan korkeus) [mm]

Näiden lisäksi maanäytteestä määritetään vesipitoisuus, märkätilavuuspaino ja kuivatilavuuspaino kaavojen (4-8) – (4-10) mukaan:

$$w = 100 \cdot \frac{B_m - B_k}{B_k - B} \quad (4-8)$$

$$\gamma = \frac{(B_m - B) \cdot g \cdot 10^3}{V} \quad (4-9)$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{w}{100}} \quad (4-10)$$

joissa	w on	vesipitoisuus, [%]
	B _m	astia + näyte märkänä, [kg]
	B _k	astia + näyte kuivana, [kg]
	B	astian massa, [kg]
	V	näytteen tilavuus, [m ³]
	γ	märkätilavuuspaino, [kN/m ³]
	γ _d	kuivatilavuuspaino, [kN/m ³]
	g	putoamiskiihtyvyys, 9,807 [m/s ²]

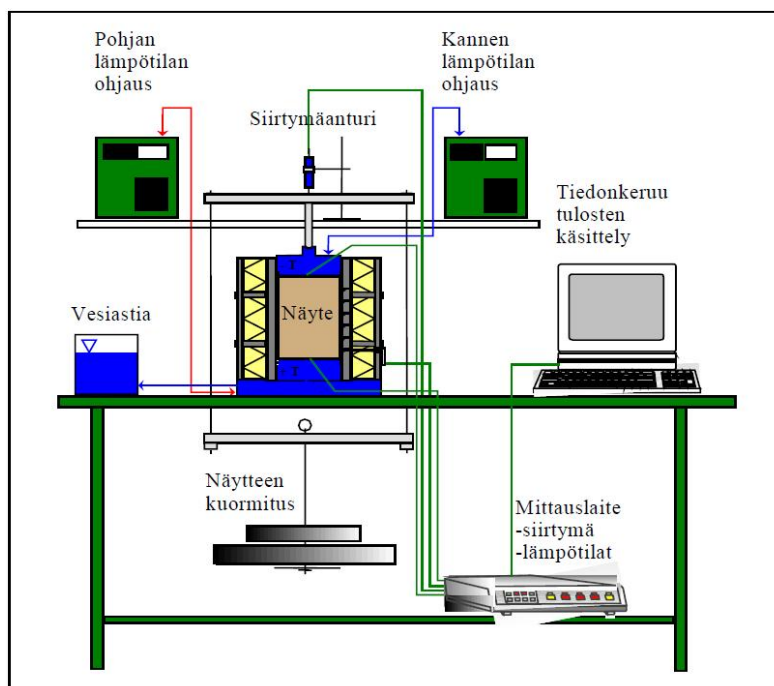
5. KOELAITTEISTON KUVAUS

5.1 Yleistä

Routanousukokeen suorittamista varten tarvitaan seuraavat laitteet: (Onninen, 2001)

- Kylmäkaappi (tai kylmähuone), johon routanousukoelaitteiston selli sijoitetaan vaakasuuntaisen lämpövirran vähentämiseksi.
- Kaksi jäähdytyslaitteistoa, joilla kierrätetään pakkasnestettä routasellin kannessa ja pohjassa.
- Kansielementti, jonka alapinnassa on lämpötila-anturi. Kansielementissä kierrätetään -3 °C nestettä.
- Pohjaelementti, jonka yläpinnassa on lämpötila-anturi ja jossa kierrätetään $+1\text{ °C}$ nestettä.
- Routaselli.
- Vesiastia, jossa veden pintaa voidaan pitää vakiokorkeudella kokeen aikana.
- Kuormituskehikko, jonka avulla maanäytettä voidaan kuormittaa.
- Instrumentointi, sisältäen
 - lämpötila-anturit
 - siirtymäanturin
 - tiedonkeruujärjestelmän.

Periaatekuva routanousukokeen koejärjestelyistä on esitetty alla.



Kuva 7. Routanousukokeen koejärjestelyt (Koskinen, 1998)

5.2 Kylmäkaappi

Kokeet suoritettiin $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ympäristössä vaakasuuntaisten lämpövirtausten minimoimiseksi. Tätä varten hankittiin kylmäkaappi, jonka sisälle koelaitteisto asennettiin. Kylmäkaapiksi valittiin Helkaman C5GZ Sub Zero. Kylmäkaappiin porattiin läpiviennit jäähdytyslaitteistojen nestekierroille sekä anturien kaapeleille.

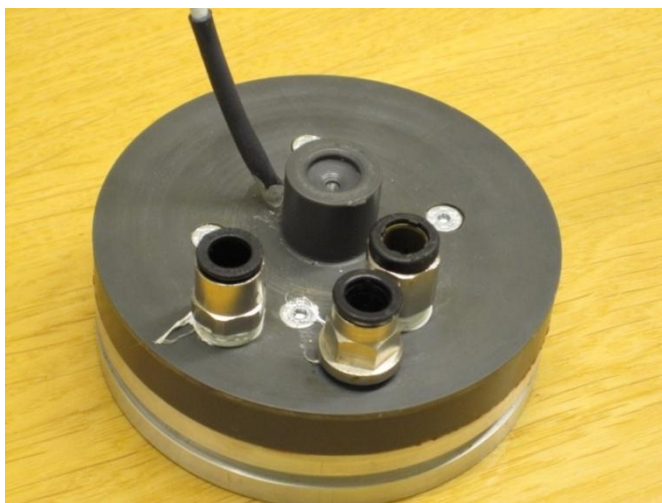
Kylmäkaapin automaattinen sulatusjärjestelmä aiheuttaa vaihtelua kaapin sisälämpötilaan. Sulatuksen vaikutusta pyrittiin minimoimaan ohjelmoimalla termostaatti lyhyisiin jäähdytys- ja sulatussykleihin. Kaapin pyyntilämpötilaksi asetettiin $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja lämpötilan differenssi asetettiin minimiin ($\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$). Kokeissa käytetyt termostaatin asetukset on esitetty liitteessä 1.

5.3 Kansielementti

Kansielementti toimii mäntänä, joka nousee routanousun mukana. Kansielementin avulla hallitaan näytteen yläpinnan lämpötilaa, kierrättämällä sen läpi $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ nestettä. Kansielementin halkaisija on 99 mm ja se koostuu alumiiniosasta ja PVC-osasta, sekä huokoskivestä. Kansielementin yhteenlaskettu massa on 1100 g.

Alumiiniosa on kosketuksissa huokoskiven välityksellä varsinaiseen näytteeseen. Alumiiniosaan jyrsittiin kanava nestekiertoa varten sekä porattiin läpiviennit lämpötila-anturille ja vedensyötölle. Lisäksi alumiiniosaan jyrsittiin varaus huokoskivelle sekä O-renkaalle. Piirustus alumiiniosasta on liitteenä 2.

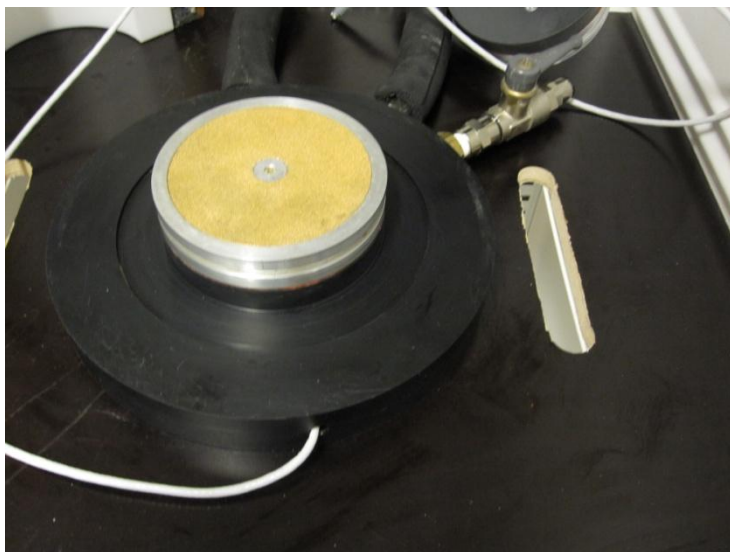
PVC-osa kiinnitettiin alumiiniosaan ruuveilla ja tiivisteliimalla. PVC-osaan tehtiin läpiviennit lämpötila-anturille, nestekierron tulo- ja poistoletkuille sekä kyllästysvedelle. Piirustus PVC-osasta on esitetty liitteessä 3. Kuva 8 esittää kansielementtiä.



Kuva 8. Kansielementti

5.4 Pohjaelementti

Pohjaelementti toimii sellin perustana ja sen avulla hallitaan näytteen pohjan lämpötilaa. Pohjaelementti koostuu kansielementin tavoin kahdesta osasta: alumiiniosa ja PVC-osa. Alumiiniosa toimii samoin kuin kansielementissä. Pohjaelementin alumiiniosan kanavassa kierrätetään $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ nestettä. PVC-osassa on varaukset nestekierrolle, kyllästysvedelle sekä kiinnitysruuveille. Valokuva pohjaelementistä on esitetty kuvassa 9. Tarkka piirustus pohjaelementistä on liitteenä 4.



Kuva 9. Pohjaelementti, etualalla lämpötila-anturin kaapeli, taka-alalla nestekierron letkut ja vedensyötön hana

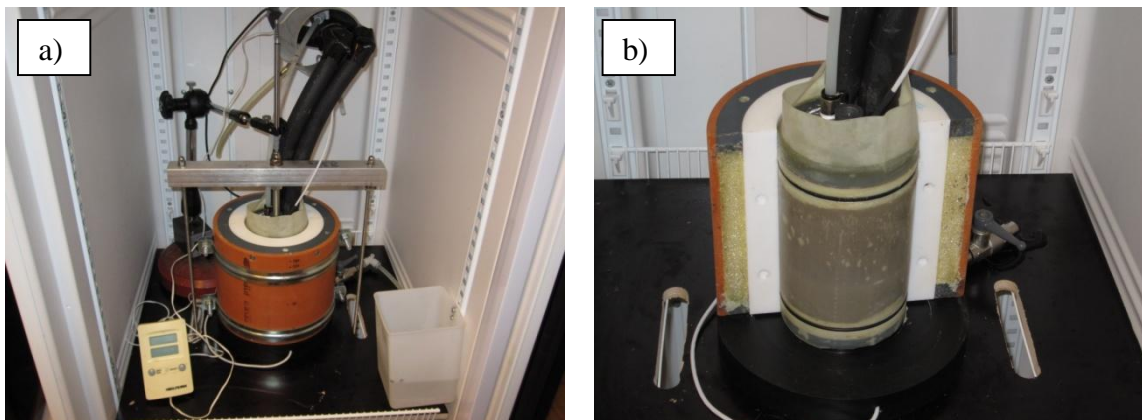
5.5 Kuormituskehä

Kokeissa käytetty kuormituskehä on massaltaan 835 g. Kuormituskehä tukeutuu kansielementtiin (massa 1100 g), siirtäen koko massansa kansielementin kannateltavaksi. Näin ol-
len kuormituskehän ja kansielementin yhteenlaskettu massa on 1935 g. Kansielementin halkaisijan ollessa 99 mm kohdistuu maanäytteeseen 2,4 kPa:n kuormitus. Kokeet suoritettiin tällä kuormalla. Siirtymää mitattiin kuormituskehän liikkeistä.

5.6 Halkaistava selli

5.6.1 Yleistä

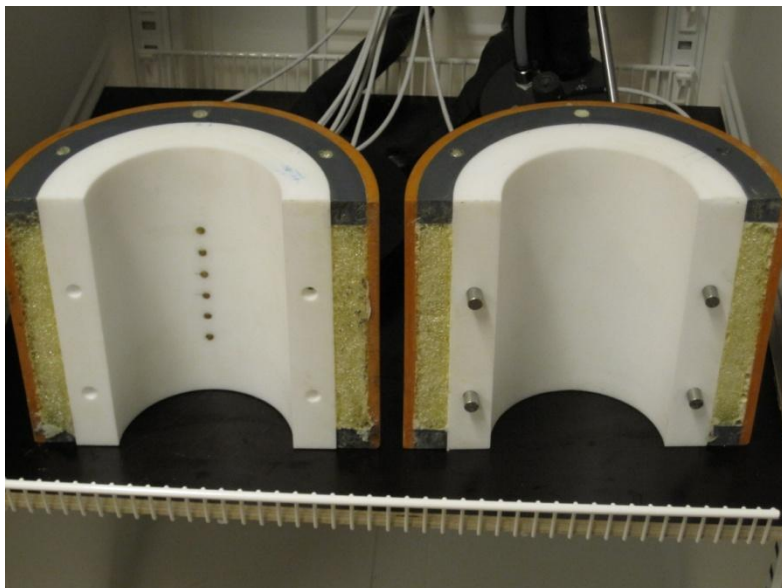
Kuva 10 esittää yleiskuvaa halkaistavasta sellistä. Koko sellirakenteen poikkileikkaukset on esitetty liitteessä 5.



Kuva 10. a) Halkaistava selli koottuna b) halkaistavan sellin puolikas ja kumimembraanin sisään asetettu näyte

5.6.2 Vaipparakenne

Sellin runkona toimii teflonista valmistettu halkaistava sylinteri, jonka sisähalkaisija on 101 mm, vaipan paksuus 24,5 mm ja korkeus 170 mm. Teflonsylinterin ympärille rakennettiin 200 x 5,9 PVC-muovista ulkokuori. Ulkokuoren ja teflonin väliin jäävä tyhjä tila eristettiin 2-komponenttipolyuretaanilla. Teflonsylinterin toiseen puoliskoon porattiin kuusi halkaisijaltaan 4 mm varausta lämpötila-antureille. Polyuretaanivalun ajaksi anturien läpivientien paikoille asetettiin ruuvit. Vaipparakenne on esitetty kuvassa 11. Ennen näytteen asettamista sellin teflonpinta voideltiin pakkasen kestäväällä silikonirasvalla pinnan kitkan pienentämiseksi. Tarkat piirustukset vaipasta on esitetty liitteessä 6.



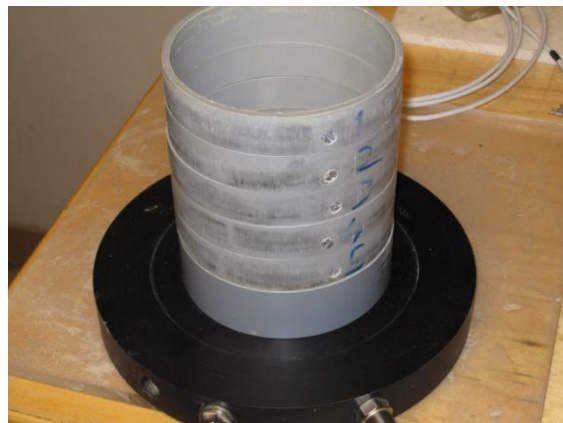
Kuva 11. Halkaistavan routasellin vaipparakenne, vasemmanpuoleisessa kappaleessa näkyvät lämpötila-anturien messinkisuojat.

5.7 Rengasselli

5.7.1 Yleistä

Rengasselli rakennettiin 110 x 3,4 PVC-muoviputkesta. Renkaat pääsevät vapaasti liikkumaan toisiinsa nähden maanäytteen routiessa ja näin ollen kitkan vaikutus rajoittuu ainoastaan yhden renkaan korkeuteen. Maanäytteen routiessa renkaiden korkeusasemat kuitenkin muuttuvat. Tämä aiheuttaa pientä epätarkkuutta routarajan interpolointiin, joka heijastuu myös määritettävään routimiskertoimeen. Virhe tiedostettiin, mutta sitä ei yritetty korjata tulosten käsittelyssä.

Vedensyöttöä näytteeseen säädeltiin asettamalla selli astiaan, jossa veden pinta nostettiin kyllästysvaiheessa näytteen yläpinnan tasolle ja laskettiin varsinaisen kokeen ajaksi näytteen alapinnan tasolle. Kuva 12 esittää yleiskuvan rengassellin koejärjestelyistä.



Kuva 12. Yleiskuva rengassellistä

5.7.2 Vaipparakenne

Renkaiisiin tehtiin pontit estämään maa-ainesta varisemasta pois kokeen aikana. Pontitettuja renkaita oli yhteensä viisi kappaletta ja renkaan pontin korkeus oli 8 mm ja sellin yhteenlaskettu korkeus pontteihinsa asennettuina 100 mm. Pohjakappaleeksi tehtiin 32 mm korkea pontittamaton tukikappale. Renkaiden ympärille tehtiin eristekappaleet polyuretaanilevystä. Tarkat piirustukset rengassellin vaipparakenteesta on esitetty liitteessä 7.

5.8 Instrumentointi

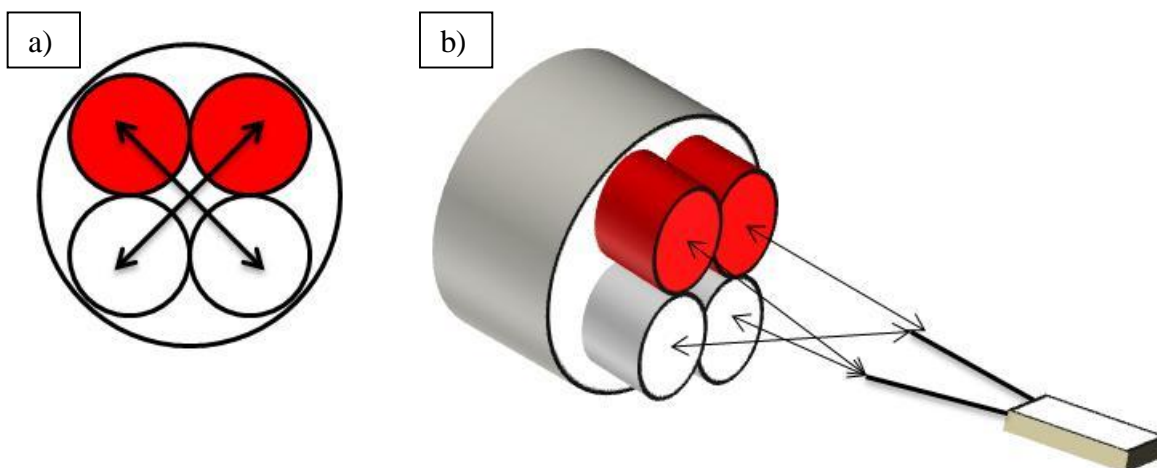
5.8.1 Lämpötila-anturit

Lämpötiloja mitattiin sellin kyljestä, sekä kansi- ja pohjaelementistä. Lämpötilamittauksiin käytettiin RTD vastus-antureita. Anturin tuli olla mitoiltaan mahdollisimman pieni, jotta pistemäinen lämpötilanmittaus olisi mahdollista. Selliin asennettiin 2 x 2,3 mm kokoiset PT-100 anturit, joiden tarkkuusluokka oli A ($\pm 0,15$ °C nollassa asteessa). Kuva 13 esittää kokeissa käytettyä lämpötila-anturia.



Kuva 13. PT-100 anturi, 2x2,3mm, Class A. Valmistaja: Labfacility, Maahantuoja: Farnell List No. DM-303, Order Code 1289667

Anturit liitettiin tefloneristeiseen nelijohdinkaapeliin. Kaapelissa on kaksi punaista ja kaksi valkoista johdinta. Anturit kytkettiin siten, että kaapelin ristikkäiset johtimet (punainen ja valkoinen) liitettiin yhteen ja juotettiin anturin johtimeen. Kuva 14 esittää kaapelin poikkileikkausta ja johdinten kytkentää lämpötila-anturiin.



Kuva 14. a) Nelijohdinkaapelin poikkileikkaus b) kytkentä lämpötila-anturiin

Juotoskohdat eristettiin kutistussukilla. Tämän jälkeen anturi asetettiin messingistä sorvattuun suojaputkeen. Suojaputken ja kaapelin liitoskohdan päälle asennettiin kutistussukka. Anturit nimettiin taulukon 3 mukaisesti.

Taulukko 3. Lämpötila-anturien nimet, mallit ja sijainnit maanäytteen pohjan suhteen

Nimi	Anturi	Sijainti, halkaistava selli	Sijainti, rengasselli
Kansi	Pt-100, Class A 2x2,3mm	Näytteen pinnassa	Näytteen pinnassa
Anturi 1	Pt-100, Class A 2x2,3mm	Kyljessä 85 mm näytteen pohjasta	Kyljessä 86 mm näytteen pohjasta
Anturi 2	Pt-100, Class A 2x2,3mm	Kyljessä 70 mm näytteen pohjasta	Kyljessä 66 mm näytteen pohjasta
Anturi 3	Pt-100, Class A 2x2,3mm	Kyljessä 55 mm näytteen pohjasta	Kyljessä 46 mm näytteen pohjasta
Anturi 4	Pt-100, Class A 2x2,3mm	Kyljessä 40 mm näytteen pohjasta	Kyljessä 26 mm näytteen pohjasta
Anturi 5	Pt-100, Class A 2x2,3mm	Kyljessä 25 mm näytteen pohjasta	Kyljessä 6 mm näytteen pohjasta
Anturi 6	Pt-100, Class A 2x2,3mm	Kyljessä 10 mm näytteen pohjasta	
Pohja	Pt-100, Class A 2x2,3mm	Näytteen pohjassa	Näytteen pohjassa

Routaraja interpoloitiin anturien sijaintien perusteella. Rengassellissä anturit pääsevät liikumaan renkaiden mukana aiheuttaen anturien alkuperäisten asemien muutoksen. Tämä puolestaan johti pieniin virheisiin roudan syvyyden interpolointituloksissa.

5.8.2 Siirtymäanturi

Siirtymää mitattiin jännitteen funktiona. Siirtymäanturina käytettiin Solatronin LVD-anturia, joka asetettiin toimimaan välillä $\pm 1,25$ V vastaten ± 10 mm siirtymää. Anturi kalibroitiin mikrometriruuvilla. Kalibroituloksista laskettiin jännitteen arvot siirtymiksi muutettava kerroin ”gain”.

5.8.3 Tiedonkeruujärjestelmä

Tiedonkeruujärjestelmään kuuluvat tietokone, tiedonkeruulaite ja mittausohjelma. Tiedonkeruulaitteeksi valittiin Datatranslationin TEMPpoint 16 ch RTD Measurement Instrument. (Maahantuojana Mespek Oy, tuotekoodi DT8872-16). Laite on 16-kanavainen ja tarkoitettu RTD-antureille.

TEMPpoint laite on tarkoitettu ensisijaisesti lämpötilojen mittaamiseen. Laitteen mukana tulleessa ohjelmassa ei ollut vakiona mahdollisuutta mittaustulosten esikäsittelyyn. Jotta jännitearvot voidaan muuttaa siirtymiksi, tulee niihin soveltaa kerrointa M (gain). Kokeen

seurannan ja tulosten jälkikäsitteilyn helpottamiseksi ohjelmistoa muokattiin siten, että kanavan 0 (Ch0) mittaamat jännitteen arvot kerrottiin siirtymäanturin kalibroinnista saadulla kertoimella. Lisäksi siirtymän mittauskanavaan ohjelmoitiin nollansiirto (offset), jotta siirtymäanturin lähtöasema voitiin nollata kokeen alussa.

6. KOKEISSA KÄYTETYT MAA-AINEKSET

6.1 Testimateriaalit

Testattavina maa-aineksina käytettiin Lahden silttiä ja Tampereen hiekkaa. Siltti on peräisin tutkimuksesta ”Lahti – Pohjolan pengerr” vuodelta 1986. Tutkimuksen aikana kerätyt häiriintymättömät maanäytteet oli suljettu tiiviisti näyteputkiinsa ja säilötty Teknillisen korkeakoulun kylmätiloihin. Toikka (1984) on tutkinut samaisen siltin mekaanisia ominaisuuksia diplomityössään. Tampereen hiekka on peräisin Tampereen rautatieaseman välittömässä läheisyydessä sijaitsevalta tontilta osoitteesta Tullikatu 2. Häiriintynyt näyte otettiin kaivinkoneella noin kolmen metrin syvyydeltä 25.9.2009. Kuva 15 esittää maanäytteiden keräyspaikkoja.



Kuva 15. a) Lahden siltti ”Lahti”, b) Tampereen hiekka ”Tre2”

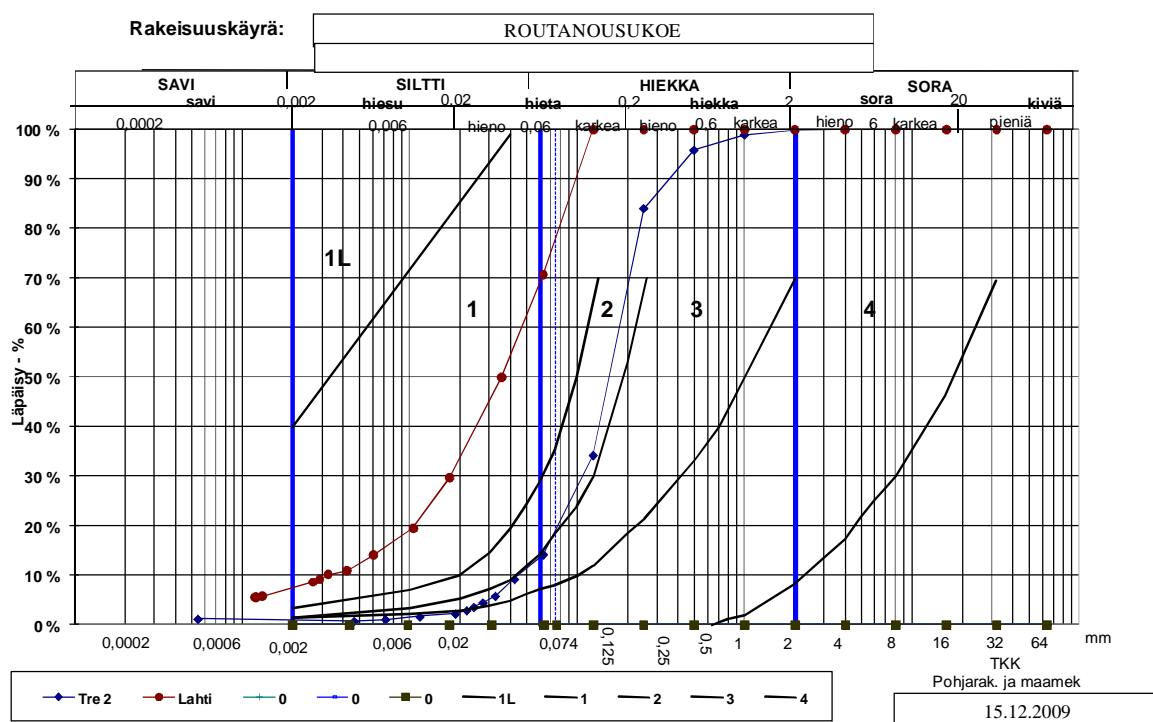
Lahden siltin näyteputket avattiin ja homogenisoitiin mahdollisimman tasalaatuisen testimateriaalin aikaansaamiseksi. Maa-aineksille suoritettiin seuraavat kokeet:

- pesuseulonta
- aroemetrikoe
- kiintotiheyden määrittäminen
- humuspitoisuuden määrittäminen
- vesipitoisuuden määrittäminen
- kapillaarisuuskoe.

Routanousukokeissa käytettyjen maa-ainesten rakeisuuskäyrät on esitetty kuvassa 16. Kuvassa on myös esitetty yleinen rakeisuuteen perustuva kvalitatiivinen routivuusluokittelu (ISSMFE TC - 8, 1989):

- 1L on lievästi routiva
- 1 on routiva

- 2, 3, 4 ovat routimattomia, alueella 2 sijaitsevien maiden kapillaarisuus tulee tarkistaa.



Kuva 16. Testeissä käytettyjen maa-ainesten rakeisuuskäyrät

Yllä olevasta kuvasta havaitaan, että maanäytteen ”Lahti” rakeisuuskäyrä sijaitsee alueella 1 ja on näin ollen routivaa, kun taas maanäytteen ”Tre2” rakeisuuskäyrä on alueella 2, leikaten oikeanpuoleisen rajakäyrän noin 15 % läpäisyarvolla viitaten näin ollen routimattomaan maalajiin. Maanäytteen ”Tre2” rakeisuuskäyrä sijaitsee valtaosin alueella 2. Tällöin on maalajin kapillaarisuus testattava ennen kuin maalaji voidaan luokitella routimattomaksi (ISSMFE TC - 8, 1989). Maanäytteiden rakeisuuteen perustuva standardin ISO 14688-2 mukainen maalajiluokitus on esitetty liitteessä 8.

Testattavat maalajit olivat geotekniseltä maalajiluokituksestaan hiekka ja siltti. Maanäytteistä määritetyt vesipitoisuudet vaihtelivat hiekalla (Tre2) välillä 12 – 14 % ja siltillä (Lahti) välillä 19 – 22 %. Kapillaarinen nousukorkeus oli maanäytteellä ”Tre2” 1,4 m, joten se on taulukossa 1 annettujen kriteerien mukaan lievästi routivaa. Maanäytteellä ”Lahti” puolestaan havaittiin 2,2 m kapillaarista nousukorkeutta, joten se luokitellaan taulukon 1 mukaan erittäin routivaksi. Testimateriaalien vesi- ja humuspitoisuudet, sekä kiintotiheys ja kapillaarisuus on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Testimateriaalien ominaisuuksia

Näyte	Maalajiluokitus		Vesi- pitoisuus	Humus- pitoisuus	Kiinto- tiheys	Kapillaari- suus
	ISO	GEO	[%]	[%]	[t/m ³]	[m]
Tre2	sand (Sa)	hiekkä (Hk)	12 - 14	1,1	2,73	1,40
Lahti	sandyclayey Silt (saclSi)	siltti (Si)	19 - 22	1,4	2,70	2,20

Kitkamaalajilla hehkutushäviö vastaa riittävällä tarkkuudella humuspitoisuutta. Hienorakeisilla maalajeilla hehkutushäviöstä vähennetään haihtuneen kideveden osuus, joka arvioidaan näytteen sisältämän savilajitteen perusteella. (GLO-85, 1985)

Näyte ”Tre2” on kitkamaalaji ja sen savipitoisuus on rakeisuuskäyrän (kuva 16) mukaan 1,1 %. Näyte ”Lahti” on hienorakeisempi ja sen savipitoisuus on 7,5 %. Geoteknisissä laboratorio-ohjeissa (GLO-85, 1985) esitetystä kuvaajassa kideveden osuus voidaan arvioida ainoastaan maalajeille joiden savipitoisuus on yli 10 %. Alhaisen savipitoisuuden vuoksi näytteelle ”Lahti” ei suoritettu kideveden haihtumisesta johtuvaa korjausta.

6.2 Näytteen valmistus

Maanäytteet valmistettiin ICT-150RB (Intensive Compaction Tester) kiertotiivistyslaitteistolla. Lainpelto (1998) kuvaa kiertotiivistyslaitteen toimintaperiaatetta tarkemmin diplomityössään. Laite on alun perin kehitetty jäykkien betonimassojen tutkimiseen 1980-luvun alkupuolella (Lainpelto, 1998). Tätä tutkimusta varten valmistetut näytteet tiivistettiin työmäärällä 100 kierrosta 600 kPa:n paineella. Kumpaakin maa-ainesta punnittiin 1500 g yhtä näytettä varten. Näytteisiin ei lisätty vettä, vaan ne tiivistettiin luonnollisessa vesipitoisuudessaan.

Halkaistavan sellin näytteet tiivistettiin käyttäen tiivistyslaitteiston vakio muotteja. Molemmat testimateriaalit pysyivät koossa ja sietivät tiivistyslaitteelta routaselliin tehtävän siirron aiheuttaman rasituksen. Valmiiden maanäytteiden halkaisija oli 100 mm. Kuva 17 esittää halkaistavaa selliä varten tiivistettyä maanäytettä.



Kuva 17. Halkaistavan sellin tiivistetty maanäyte, työmäärä 100 kierrosta 600 kPa:n paineella

Rengassellillä tehtävissä kokeissa renkaat pinottiin erikseen valmistetun teräsmuotin sisään. Tämän jälkeen maa-aines lisättiin muottiin ja muotti asetettiin tiivistyslaitteeseen. Maa-aines tiivistettiin suoraan renkaiden sisään. Rengasselliin valmistettujen maanäytteiden halkaisija oli 103,2 mm. Kuva 18 esittää kiertotiivistintä ja rengasselliin tiivistettyä maanäytettä.

Näytteen korkeus mitattiin ennen kokeen alkua kolmesta kohdasta ja niiden keskiarvo merkittiin näytteen lähtökorkeudeksi. Vesipitoisuus määritettiin ylimääräisestä maa-aineksesta kaavan (4-8) mukaan. Näyte punnittiin ja sen tilavuus laskettiin korkeuden ja halkaisijan avulla. Märkä- ja kuivatilavuuspainot määritettiin kaavojen (4-9) ja (4-10) mukaan. Ennen jäädytyksen aloitusta näytteen annettiin kyllästyä nostamalla vedenpinnan taso näytteen yläpinnan tasolle. Kokeen jälkeen näytteen korkeus ja routarajan syvyys mitattiin manuaalisesti. Tämän jälkeen näyte punnittiin ja kuivatettiin vesipitoisuuden määrittämiseksi.



Kuva 18. a) Kiertotiivistin b) rengasselliin tiivistetty maanäyte, työmäärä 100 kierrosta 600 kPa:n paineella

7. TULOKSET

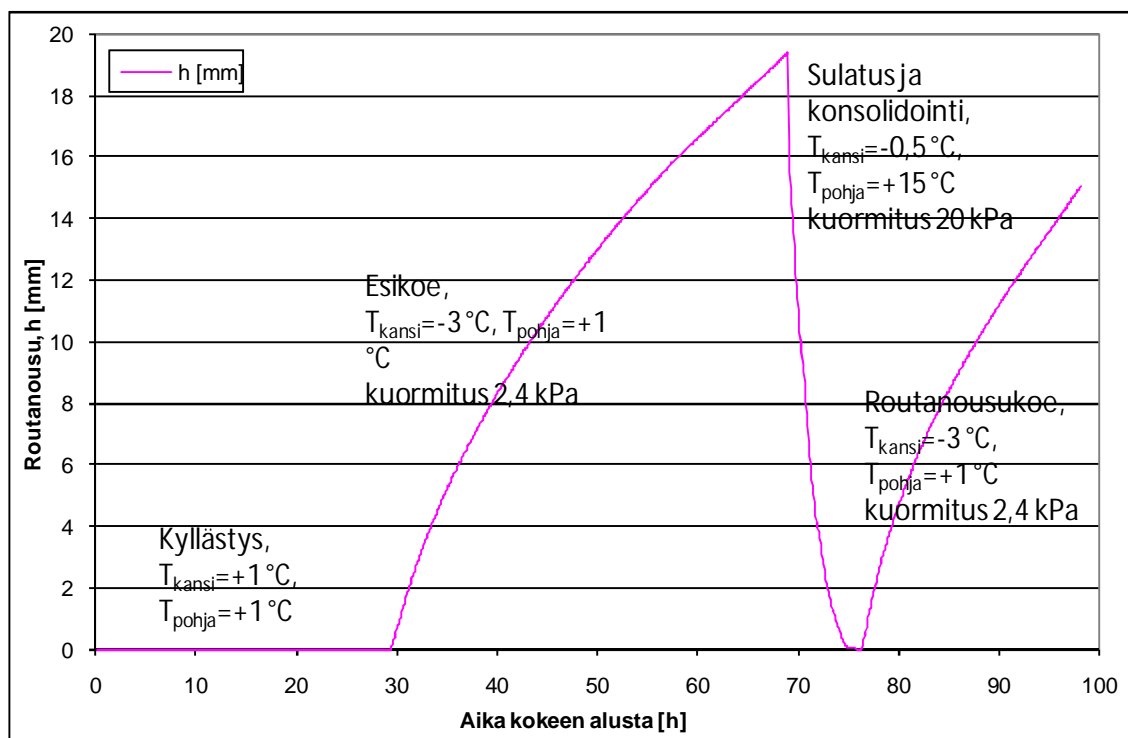
7.1 Yleistä

Seuraavat seikat vaikuttavat routanousukokeista saataviin tuloksiin: (Kujala & Ravaska, 1989)

- koelaitteisto
 - kitkan hallinta
 - jäädytyssuunta
- raja-arvot
 - kylmän ja lämpimän pinnan lämpötilat
 - kuormitus
 - vedenpinnan asema
- näytteen ominaisuudet
 - näytteen koko (korkeus ja halkaisija)
 - raekokojakauma
 - tiheys
 - vesipitoisuus
 - kyllästysaste
 - tiivistystapa.

Kaikki yllä mainitut tekijät pyrittiin koejärjestelyissä vakioimaan ja ainoana muuttujana oli koelaitteisto (maanäytteen ja sellin välinen kitka).

Koska näytteet olivat rakennettuja, suoritettiin ennen varsinaista routanousukoetta esikoe. Esikoe tehtiin 2,4 kPa:n kuormituksella (kansielementti + kuormituskehä). Sulatus- ja konsolidointivaiheessa kuormitus nostettiin 20 kPa. Esiroutanousukokeen tarkoituksena oli saada näyte kyllästymään paremmin aikaansaamalla näytteen routiminen ja konsolidoimalla näyte. Kuva 19 esittää kokeen suorituksen eri vaiheet. Jäljempänä esitetyt tulostuskuvat koskevat varsinaisten routanousukokeiden tuloksia.



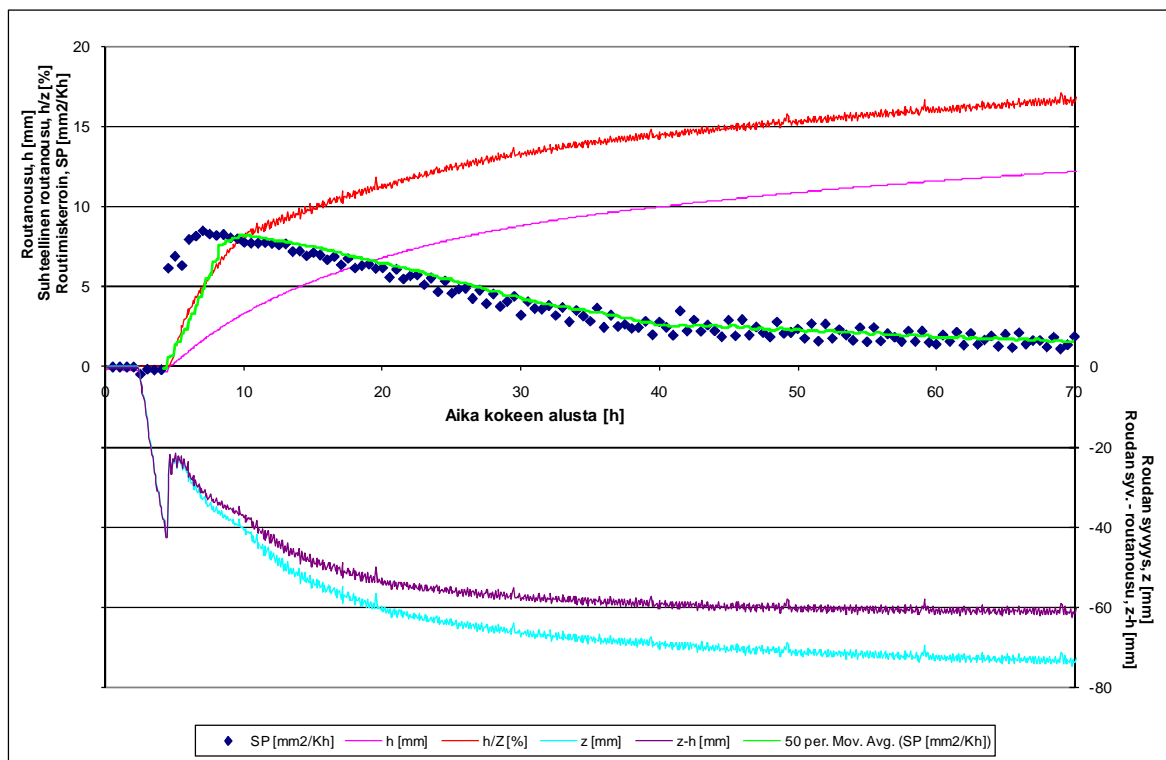
Kuva 19. Kokeen kulku: kyllästys, esikoe, sulatus ja konsolidointi, routanousukoe

Varsinainen routanousukoe aloitettiin poistamalla konsolidointikuormitus. Routanousukoe suoritettiin 2,4 kPa:n kuormituksella. Kansielementin nestekierrolle asetettiin pyyntiarvoksi $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sekä kansi- että pohjaelementin nestekierron putket olivat eristettyjä. Tästä huolimatta jäähdytyslaitteesta lähtevä $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ neste ehti lämmetä noin $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ennen kuin se saavutti kansielementin. Kokeissa havaittu kansielementin lämpötila oli siis $-2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pohjaelementissä vastaavaa häviötä ei havaittu. Tämä johtunee korkeammasta $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilasta ja siitä, että ympäröivän kylmäkaapin lämpötila oli asetettu samaan arvoon.

Koe voidaan jakaa kahteen vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa näyte alkaa jäätyä ja routaraja liikkuu alaspäin. Toisessa vaiheessa routaraja saavuttaa syvimmän tunkeutumis- tasonsa ja pysähtyy paikoilleen. Toisessa vaiheessa maanäytteen lämpötilaprofiilissa ei tapahdu enää muutoksia ja tilaa kutsutaan stabiiliksi tilaksi (steady state). Routimiskerroin määritetään siirryttäessä ensimmäisestä vaiheesta toiseen, eli silloin kun routaraja ei enää tunkeudu alemmas (roudan nettosyvyys, z-h, kuvassa 20 muuttuu vaakasuoraksi).

Tiedonkeruulaite asetettiin keräämään tietoja viiden minuutin välein. Mittaustuloksista määritettiin roudan syvyys, routanousunopeus ja lämpötilagradientti kaavojen (4-5) – (4-7) mukaan. Kuva 20 esittää tyypillistä routanousukokeen tulostuskuvaajaa. Routanousunopeuden ja lämpötilagradientin määrittämiseen käytettiin puolen tunnin välein otettuja havain- toja, jotta tulosten heilahtelu saataisiin vähäisemmäksi. Routimiskerroin määritettiin vii- denkymmenen havainnon liikkuvana keskiarvona kohdassa, jossa roudan nettosyvyys ei enää kasva. Kuvaajassa esiintyvät paikalliset piikit johtuvat kylmäkaapin automaattisesta

sulatustoiminnasta, jolloin kaapin lämpötila nousee hetkellisesti säädettyä arvoa korkeammaksi.



Kuva 20. Esimerkki routanousukokeen tulostuskuvaajasta

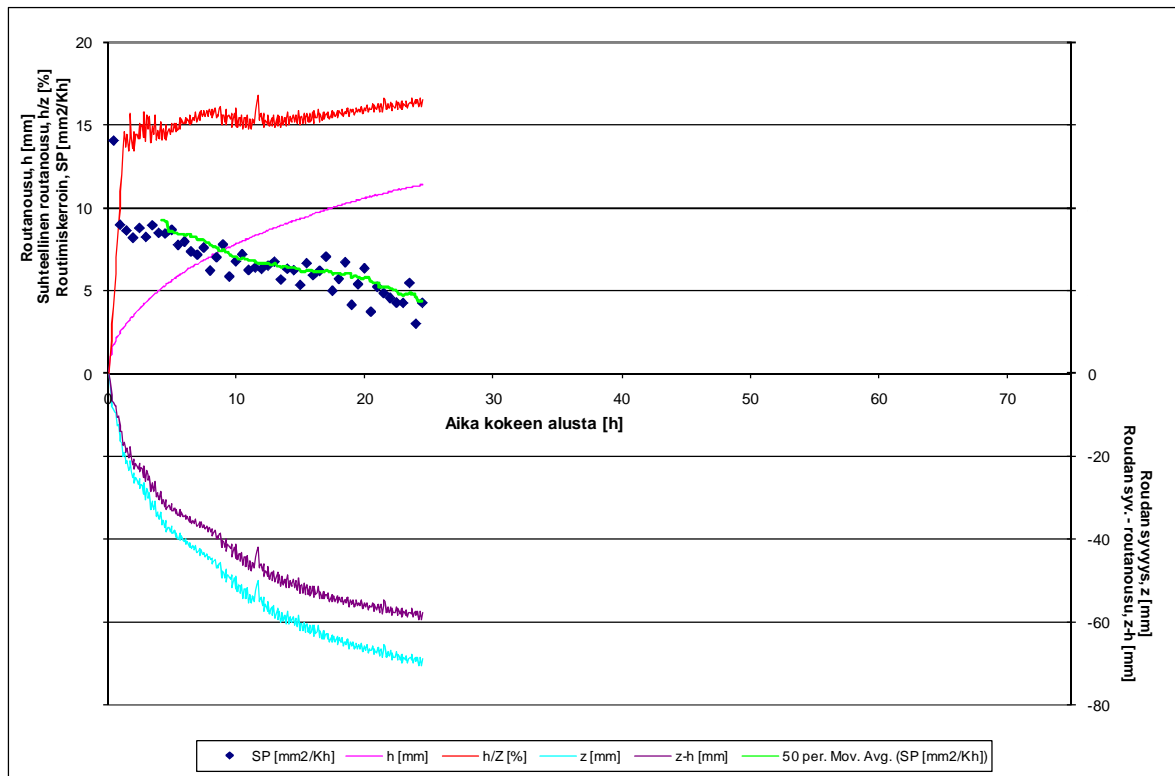
7.2 Halkaistava selli

Halkaistavalla sellillä suoritettiin neljä erillistä koetta, joista kaksi olivat rinnakkaisia näytteitä. Kokeista saadut tulokset on esitetty taulukossa 5 ja kuvissa 21 – 26. Rinnakkaisnäytteiden kuvaajat on asetettu samoihin mittakaavoihin. Tulokset on esitetty toteutuneen jäädytysajan mukaan. Näytteille suoritetuissa esikokeissa routarajan annettiin tunkeutua syvimpään tasoonsa ennen sulatusta ja konsolidointia.

Taulukko 5. Halkaistavalla sellillä tehdyt kokeet

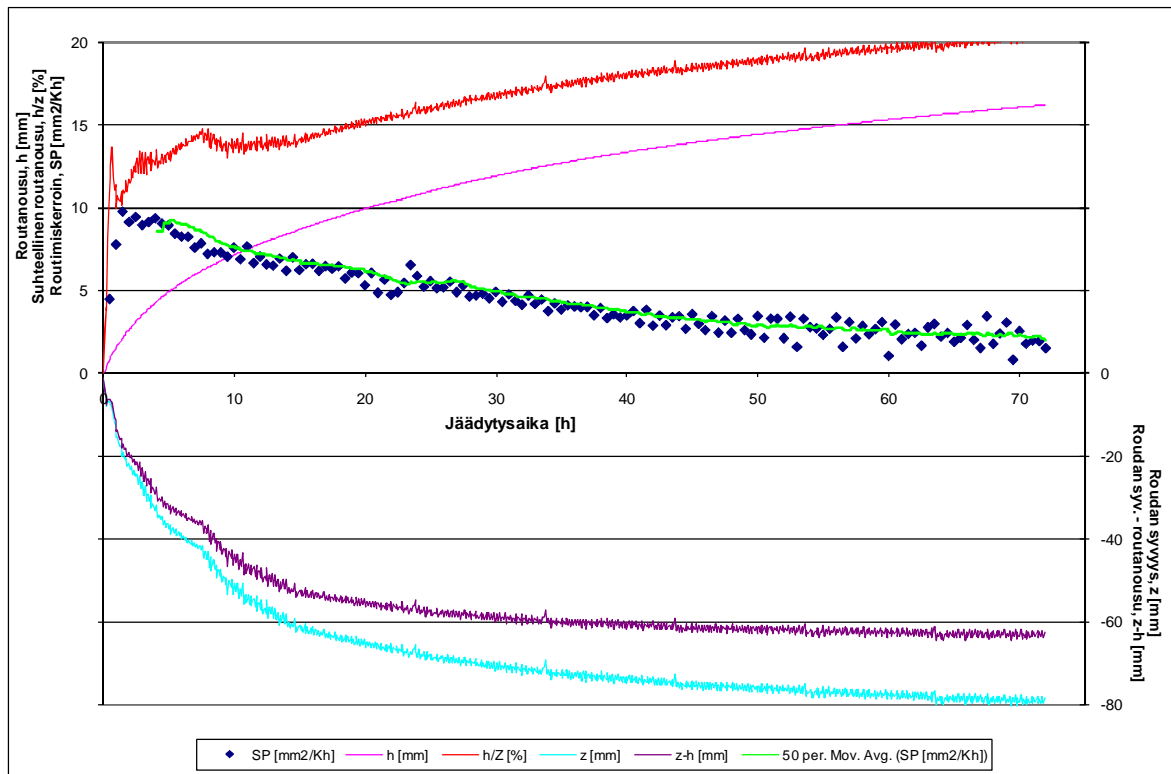
Näytteen tunnus	Näytteen lähtökorkeus	Märkätilavuuspaino	Kuiva-tilavuuspaino	Vesipitoisuus ennen koetta	Jäädytysaika	Vesipitoisuus kokeen jälkeen	Routimiskerroin
	[mm]	[kN/m ³]	[kN/m ³]	[%]	[h]	[%]	[mm ² /Kh]
Lahti (3)	93,37	19,98	16,58	20,5	25	27,8	4,9
Lahti (5)	92,05	19,96	16,60	19,9	98	43,5	2,6
Tre2 (3)	100,25	18,67	16,41	13,8	95	22,8	0,7
Tre2 (4)	101,98	18,35	16,34	12,3	115	22,6	0,5

Siltistä rakennetun maanäytteen Lahti (3) lähtökorkeus oli 93,37 mm. Toteutunut jäädytysaika oli 25 tuntia ja tässä ajassa havaittiin routanousua 11,42 mm. Routaraja havaittiin kokeen jälkeen 68,5 mm syvyydellä näytteen pinnasta. Kuva 21 esittää routanousukokeen tulostuskuvaajaa. Kuvasta voidaan havaita, että routan nettosyvyyttä esittävä käyrä (z-h) ei ole vielä asettunut vaakasuoraksi. Toisin sanoen routaraja oli vielä kokeen lopettamishetkellä liikkeessä, eikä stabiilia tilaa ollut vielä saavutettu. Routimiskertoimen kuvaajan trendi on myös laskeva. Routimiskerroin antaa arvon 4,9 mm²/Kh viimeisten havaintojen perusteella määriteltynä. Tämä arvo on kuitenkin todellisen arvon yläpuolella, sillä pidempi jäädytysaika oli tuottanut muutoksia näytteen lämpötilaprofiilissa.



Kuva 21. Maanäyte Lahti (3): näytteen lähtökorkeus 93,37mm, näytteen halkaisija 100mm, kuormitus 2,4kPa

Näytteen Lahti (5) koestusta jatkettiin pitempään kuin edellä esitetyllä Lahti (3) näytteellä. Tarkoituksena oli myös osoittaa kokeen toistettavuus. Näytteen lähtökorkeus oli 92,05 mm ja toteutunut jäädytysaika 98 tuntia. Koetta lopetettaessa näytteen korkeus oli 111,1 mm. Lopullinen jäälinssi havaittiin 75 mm syvyydessä näytteen pinnasta. Allaesittää kokeen tulostuskuvaaja.



Kuva 22. Maanäyte Lahti (5): näytteen lähtökorkeus 92,05mm, näytteen halkaisija 100mm, kuormitus 2,4kPa

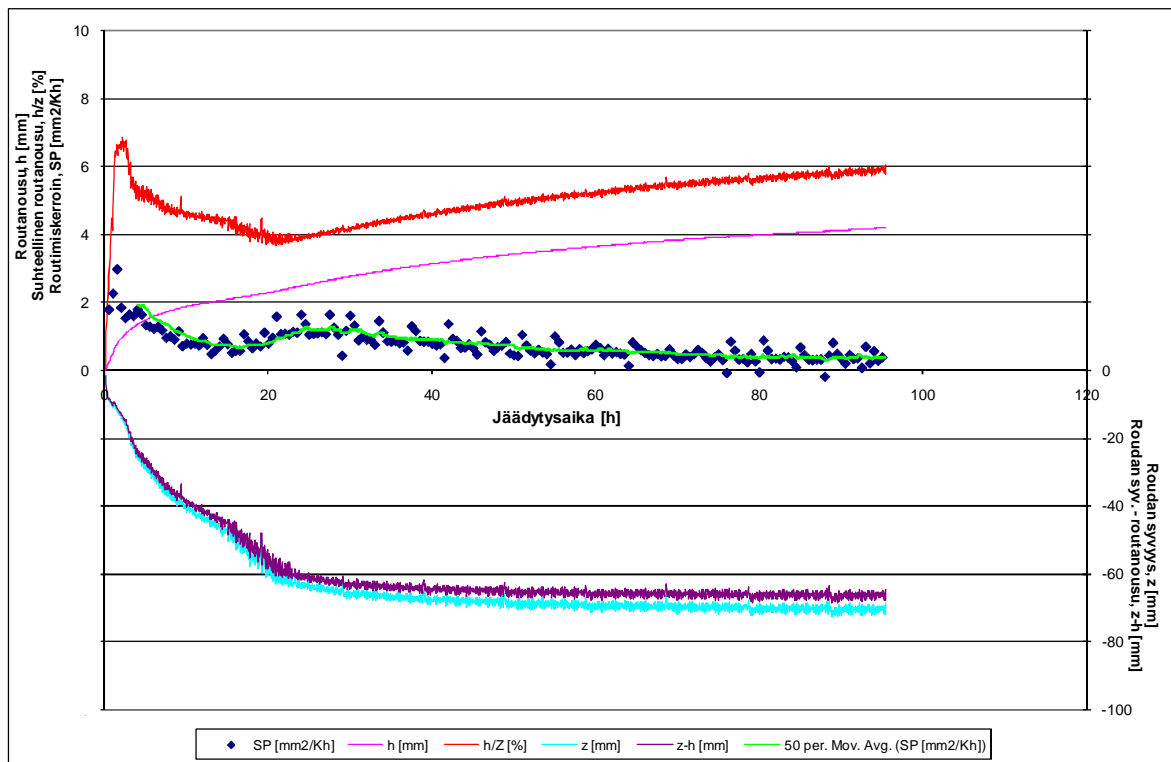
Yllä olevasta kuvasta voidaan havaita, että roudan nettosyvyyden kuvaaja asettuu vaakasuoraksi 60 jäädystystunnin jälkeen, jolloin routimiskertoimen arvoksi saadaan 2,6 mm²/Kh. Siirtymäanturin liikevara loppui kesken 72 jäädystystunnin kohdalla. Tulokset on esitetty tähän ajankohtaan asti ja viimeinen havaittu routanousu oli 16,12 mm. Näyte jatkoi routimistaan kunnes koe lopetettiin 98 jäädystystunnin kohdalla. Kokeen jälkeen manuaalisesti mitattu näytteen korkeus oli 111,1 mm. 48 ja 72 jäädystystunnin välillä havaittu routanousunopeus oli 1,98 mm/d ja routaantumisnopeus oli 2,5 mm/d. Kuva 23 esittää maanäytettä Lahti (5) kokeen jälkeen.

Kokeessa muodostunut lopullinen jäälinssi on selvästi havaittavissa. Linssi on paksuudeltaan noin 4 mm ja sen pohja sijaitsee 78 mm etäisyydellä näytteen pinnasta. Kuva 22 osoittaa routarajan olleen 70 jäädystystunnin kohdalla 79 mm etäisyydellä näytteen pinnasta. Routarajan asemaan sisältyy kuitenkin jäälinssin alapuolella sijaitseva osittain jäätynyt kerros. Ohuempia yksittäisiä jäälinssejä havaittiin 60-70 mm etäisyydellä näytteen pinnasta. Kuva 22 on varsin yhtenevä maanäytteen Lahti (3) tulostuskuvaajan (kuva 21) kanssa. Routanousun ja routimiskertoimen kehitykset olivat rinnakkaisilla näytteillä hyvin toisiaan vastaavia.



Kuva 23. a) Maanäyte "Lahti (5)" kokeen jälkeen b) näytteen korkeus c) lähikuva lopullisesta jäälinssistä

Hiekasta rakennetun maanäytteen Tre2 (3) lähtökorkeus oli 100,25 mm ja sen toteutunut jäädytysaika oli 95 tuntia. Tässä ajassa suurin havaittu routanousu oli 4,2 mm ja näytteen korkeus koetta lopetettaessa oli 104,45 mm. Kuva 24 esittää kokeen tulostuskuvaajaa. Roudan nettosyvyyden kuvaaja (z-h) muuttuu vaakasuorakasi 50 jäädytystunnin kohdalla, jolloin routimiskertoimen arvoksi saadaan 0,7 mm²/Kh. Kuva 25 esittää maanäytettä Tre2 (3) kokeen jälkeen. Routaraja oli 72 mm syvyydellä näytteen pinnasta, mutta silmin havaittavaa jäälinssiä ei ollut muodostunut. Keskimääräinen routanousunopeus oli 0,84 mm/d ja suurin määritetty routanousunopeus päivän aikana oli 2,48 mm/d.



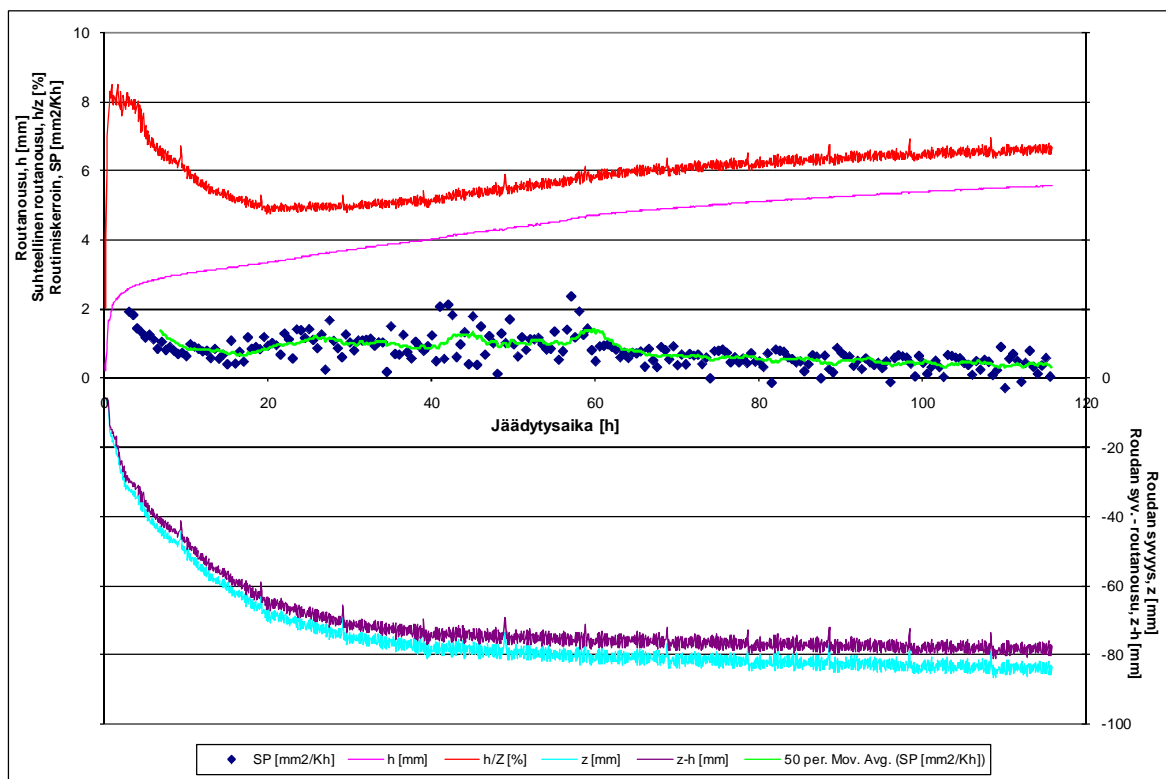
Kuva 24. Maanäyte Tre2 (3): näytteen lähtökorkeus 100,25mm, näytteen halkaisija 100mm, kuormitus 2,4 kPa



Kuva 25. Maanäyte Tre2 (3) kokeen jälkeen

Maanäytteen Tre2 (4) lähtökorkeus oli 101,98 mm ja sen toteutunut jäädytysaika oli 115 tuntia. Tässä ajassa havaittiin routanousua 5,58 mm ja näytteen korkeus koetta lopetettaessa oli 107,56 mm. Kuva 26 esittää kokeen tulostuskuvaajaa. Routan nettosyvyyden kuvaaja (z-h) muuttuu vaakasuoraksi 65 jäädytystunnin kohdalla, jolloin routimiskertoimen arvoksi saadaan 0,5 mm²/Kh. Routaraja havaittiin 83 mm syvyydellä näytteen pinnasta. Sil-

min havaittavaa jäälinssiä ei muodostunut. Keskimääräinen routanousunopeus oli 1,33 mm/d ja maksimiroutanousunopeus oli 3,49 mm/d.



Kuva 26. Maanäyte Tre2 (4): näytteen lähtökorkeus 101,98mm, näytteen halkaisija 100mm, kuormitus 2,4kPa

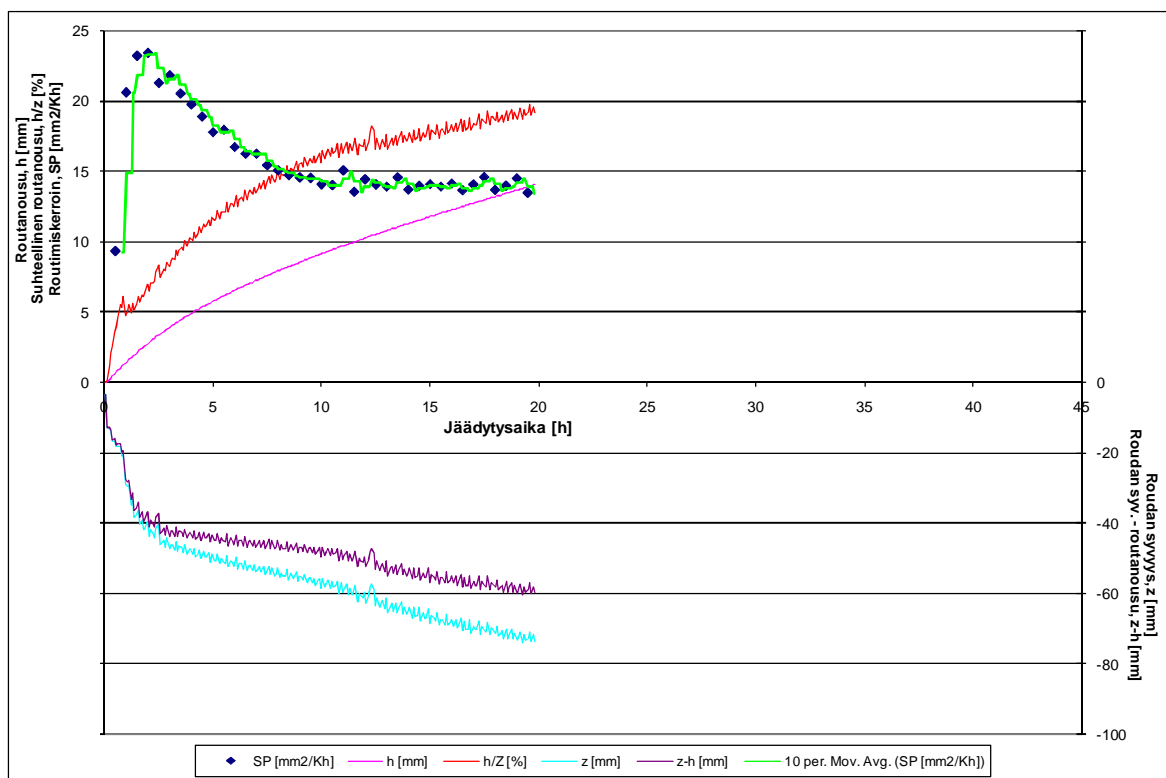
7.3 Rengasselli

Rengassellillä tehtiin neljä koetta, joista kaksi rinnakkaisilla näytteillä. Kokeista saadut tulokset on esitetty taulukossa 6 ja kuvissa 27 – 31. Rinnakkaisten näytteiden kuvaajat on esitetty samoissa mittakaavoissa. Näytteille suoritetuissa esikokeissa routarajan annettiin tunkeutua syvimpään tasoonsa ennen sulatusta ja konsolidaatiota.

Taulukko 6. Rengassellillä tehdyt kokeet

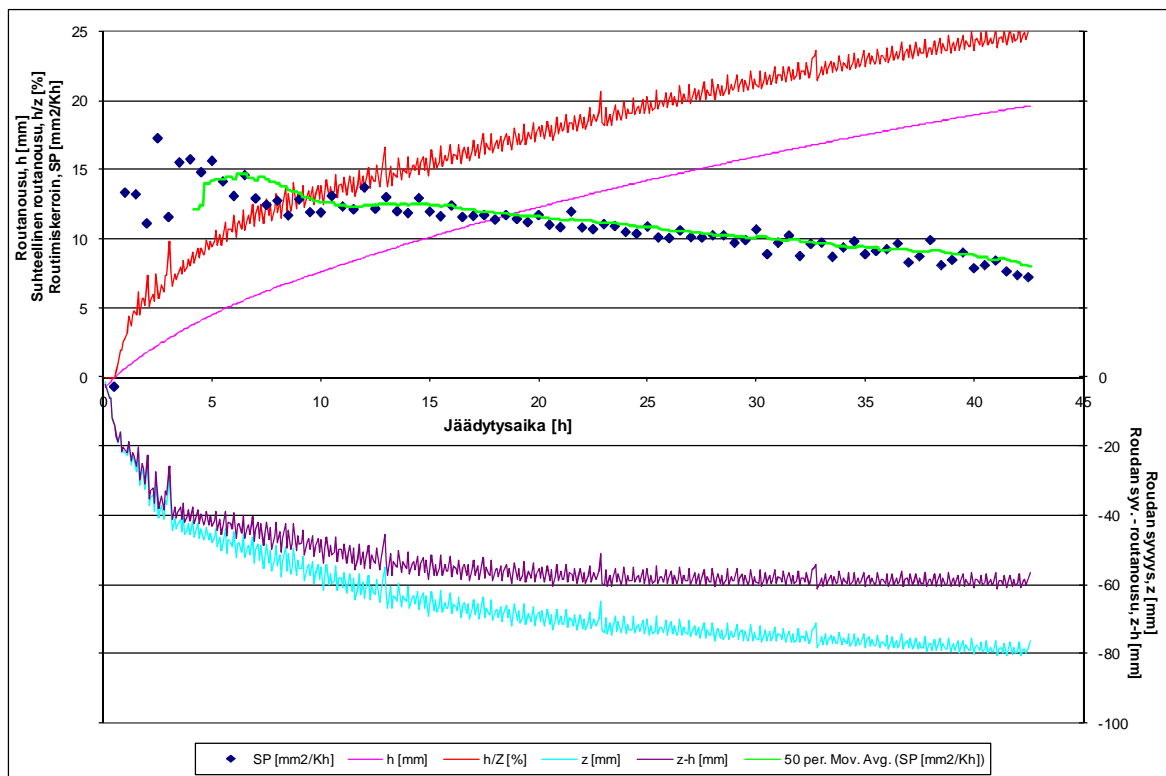
Näytteen tunnus	Näytteen lähtökorkeus	Märkätilavuuspaino	Kuiva-tilavuuspaino	Vesipitoisuus ennen koetta	Jäädytysaika	Vesipitoisuus kokeen jälkeen	Routimiskerroin
	[mm]	[kN/m ³]	[kN/m ³]	[%]	[h]	[%]	[mm ² /Kh]
Lahti (4)	88,3	19,32	15,99	20,4	20	31,5	14,0
Lahti (6)	88,7	19,83	16,18	22,5	126	42,0	9,8
Tre2 (1)	96,7	18,19	16,04	13,4	40	26,9	2,0
Tre2 (2)	96,7	18,09	16,07	12,6	125	34,3	5,5

Maanäytteen Lahti (4) lähtökorkeus oli 88,3 mm ja toteutunut jäädytysaika 20 tuntia. Havaittu routanousu koetta lopetettaessa oli 14,05 mm, eli näytteen loppukorkeus oli 102,35 mm. Kokeen tulostuskuvaaja on esitetty alla (kuva 27). Routan nettosyvyyden käyrä (z-h) on 20 jäädytystunnin kohdalla lievästi laskevassa trendissä, eli näytteen lämpötilaprofiilissa tapahtuvat muutokset eivät olleet vielä pysähtyneet kokeen lopetushetkellä. Viimeisten havaintojen perusteella määritelty routimiskerroin antaa arvoksi 14 mm²/Kh. Tämä arvo on kuitenkin todellisen arvon yläpuolella, sillä routaraja oli kokeen lopetushetkellä liikkeessä. Routimiskerroin määriteltiin poikkeuksellisesti kymmenen havainnon liikkuvana keskiarvona, koska jäädytysaika oli liian lyhyt. Esikokeen tulosten perusteella määritetty routimiskertoimen arvo oli 8,9 mm²/Kh ja se saavutettiin 35 jäädytystunnin kohdalla.

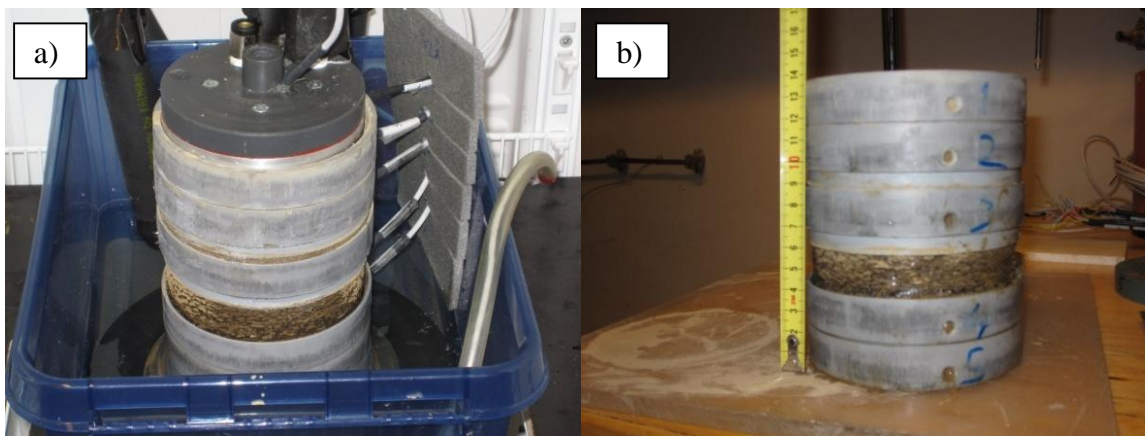


Kuva 27. Maanäyte Lahti (4): näytteen lähtökorkeus 88,3mm, näytteen halkaisija 103,2mm, kuormitus 2,4kPa

Maanäytteen Lahti (6) lähtökorkeus oli 88,7 mm ja toteutunut jäädytysaika 126 tuntia. Siirtymäanturin liikevara loppui kuitenkin kesken suuren routanousunopeuden vuoksi noin 42 jäädytystunnin jälkeen. Tulokset on esitetty tähän ajankohtaan asti ja suurin siirtymäanturilla havaittu routanousu oli 19,56 mm. Siirtymäanturin liikevaran loppuminen osattiin kuitenkin ennakoita ja kansielementin päälle asetettiin 40 mm siirtymävaralla varustettu mittakello. Mittakellon mukaan näyte oli routinut 126 jäädytystunnissa 36,68 mm ja sen kokonaiskorkeus oli 125,38 mm. Kuva 28 esittää maanäytteen Lahti (6) tulostuskuvaa. Kuva 28 vastaa varsin hyvin näytteestä Lahti (4) (kuva 27) saatuja arvoja, tosin routanousunopeus oli näytteellä Lahti (6) hieman pienempi. Roudan nettosyvyyden käyrä (z-h) asettuu vaakasuoraksi 33 jäädytystunnin kohdalla ja routimiskertoimen arvoksi saadaan tällöin 9,8 mm²/Kh. Kuva 29 esittää maanäytettä Lahti (6) kokeen jälkeen. Keskimääräinen routanousunopeus oli 9,77 mm/d ja maksimi routanousunopeus oli 13,82 mm/d.



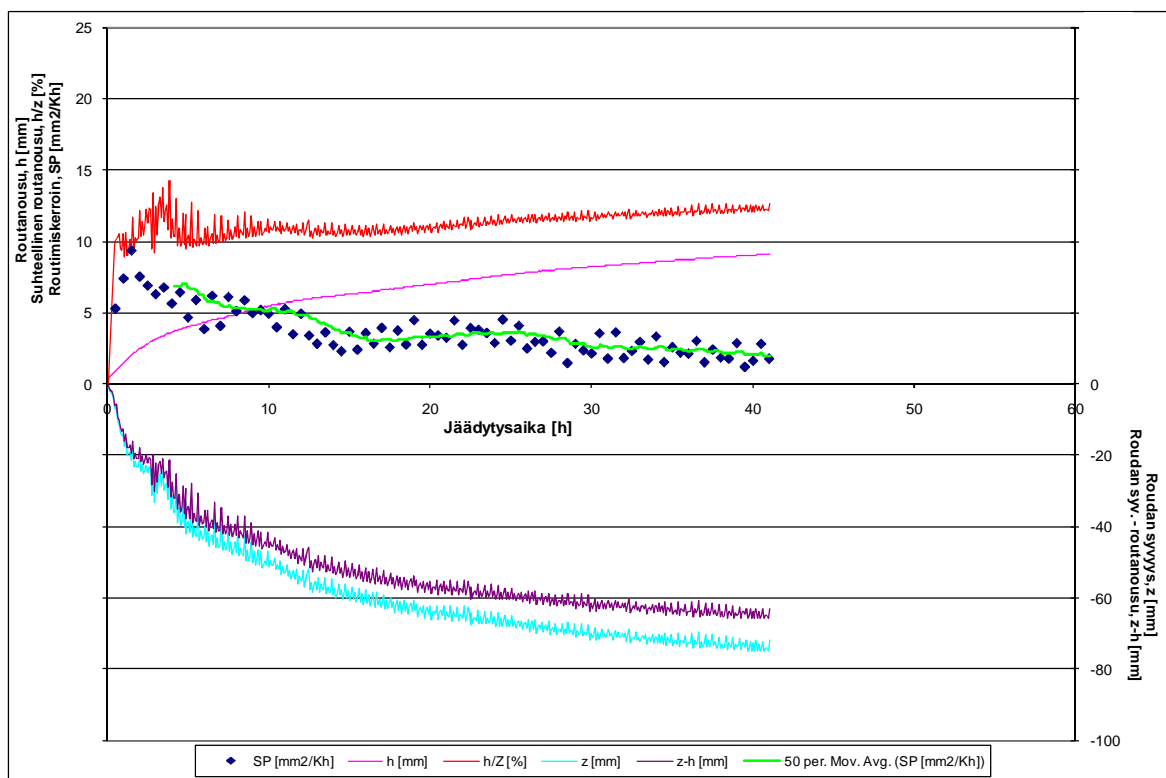
Kuva 28. Maanäyte Lahti (6): näytteen lähtökorkeus 88,7mm, näytteen halkaisija 103,2mm, kuormitus 2,4kPa





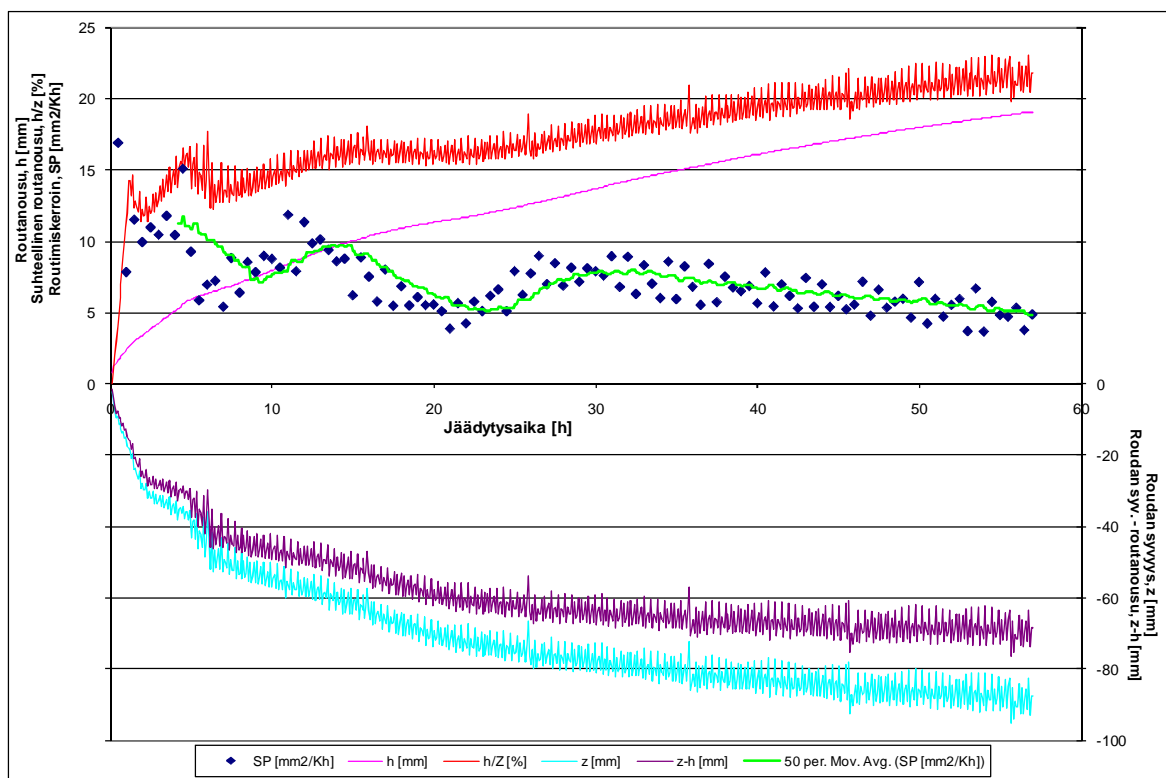
Kuva 29. a) Maanäyte Lahti (6) kokeen jälkeen b) näytteen korkeus c) lähikuva

Maanäytteen Tre2 (1) lähtökorkeus oli 96,7 mm ja toteutunut jäädytysaika oli 40 tuntia. Kokeen lopettamishetkellä näyte oli routinut 9,11 mm. Kuva 30 esittää kokeen tulostuskuvaajaa. Kokeen lopetushetkellä roudan nettosyvyyden kuvaaja on lievässä laskusuunnassa, mutta on juuri tasaantumassa. 40 tunnin kohdalta määritetty routimiskerroin antaa arvon 2,0 mm²/Kh. Maanäytteen Tre2 (1) routanousu ei ollut täysin tasaista. Sellin toinen kylki pyrki nousemaan enemmän kuin toinen. Siirtymäanturi kuitenkin mittasi nousua näytteen keskeltä, joten tuloksia ei muokattu mitenkään. Keskimääräinen routanousunopeus oli 4,55 mm/d ja maksimi routanousunopeus oli 7,55 mm/d.



Kuva 30. Maanäyte Tre2 (1), näytteen lähtökorkeus 96,7mm, näytteen halkaisija 103,2mm, kuormitus 2,4kPa

Maanäytteen Tre2 (2) lähtökorkeus oli 96,7 mm ja toteutunut jäädytysaika 125 tuntia. Siirtymäanturin liikevara loppui kesken 58 jäädystystunnin kohdalla ja suurin havaittu routanousu tässä ajassa oli 19,1 mm. Kuva 31 esittää kokeen tulostuskuvaajaa ja tulokset on siinä esitetty 58 jäädystystuntiin asti. Routan nettosyvyys vakiintuu 46 jäädystystunnin kohdalla antaen routimiskertoimen arvoksi 5,5 mm²/Kh. Havaittu routanousu oli huomattavasti suurempaa kuin rinnakkaisessa Tre2 (1) näytteessä. Routanousu oli myös näytteessä Tre2 (2) huomattavan epätasaista. Keskimääräinen routanousunopeus oli 8,82 mm/d ja maksimi routanousunopeus oli 12,14 mm/d.



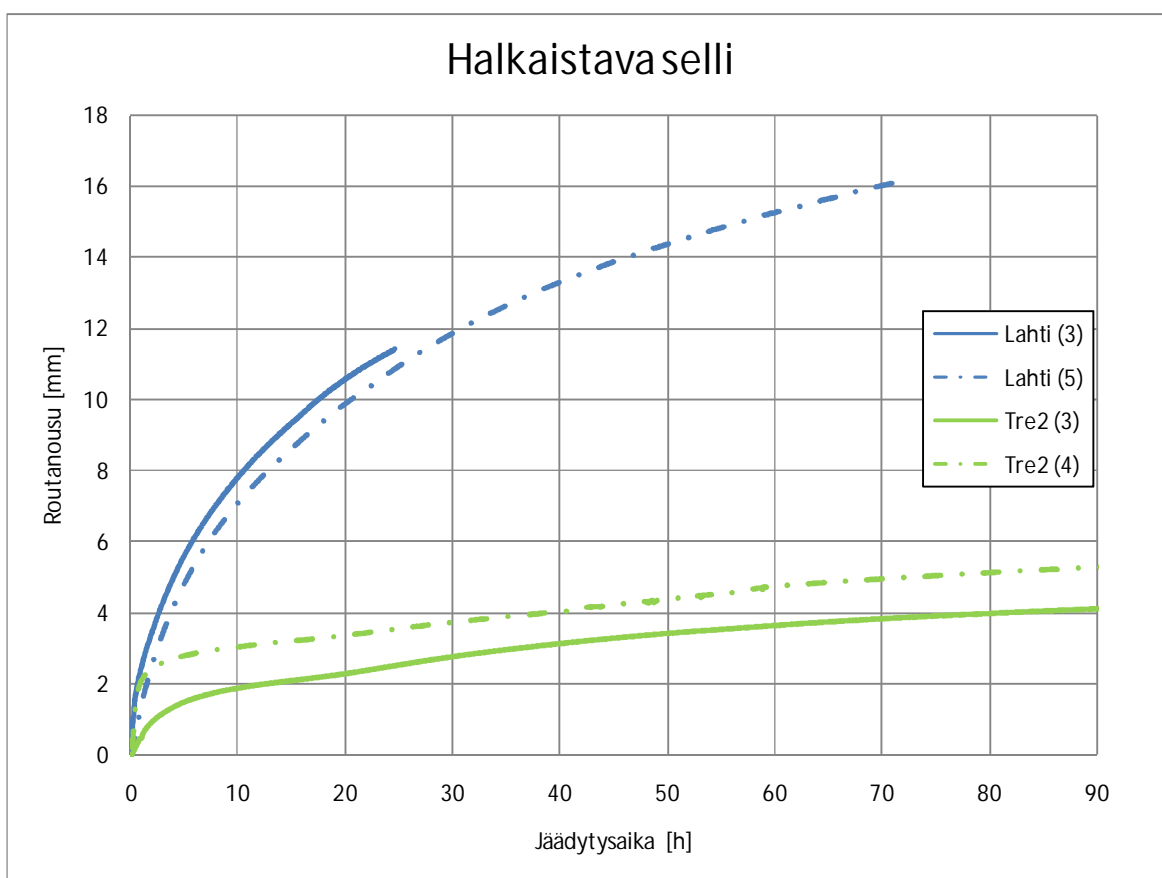
Kuva 31. Maanäyte Tre2 (2), näytteen lähtökorkeus 96,7mm, näytteen halkaisija 103,2mm, kuormitus 2,4kPa

7.4 Tulosten vertailua

7.4.1 Halkaistava selli

Routarajan pysähtyessä saavutetaan stabiili tila näytteen lämpötilaprofiilissa. Stabiili tila vallitsee viimeisen jäälänssin kasvaessa olettaen että lämpötilojen raja-arvot pysyvät muuttumattomina. Tutkimuksissa on osoitettu routanousunopeuden pienenevän monotonisesti routarajan pysähtymisen jälkeen ja lopulta pysähtyvän lähes kokonaan. Havainnon on oletettu liittyvän lopullisen jäälänssin pohjan lämpenemiseen (muuttumattomilla lämpötilojen raja-arvoilla) ja näytteen korkeuden kasvamiseen. (Konrad & Morgenstern, 1980)

Halkaistavalla sellillä havaitut routanousut jäädytysajan suhteen on esitetty kuvassa 32. Routanousunopeus pienenee ajan myötä, kuten aiemmissa tutkimuksissa on havaittu. Maanäytteiden Lahti (3) ja Lahti (5) havaitut routanousut olivat hyvin lähellä toisiaan. Hiekkaisilla maanäytteillä näytteen Tre2 (4) routanousunopeus oli kokeen alussa suurempaa kuin rinnakkaisella Tre2 (3) näytteellä. Molemmissa näytteissä routanousunopeus kuitenkin taittui nopeasti ja tasaantui samoihin lukemiin noin viiden jäädytystunnin jälkeen. Routanousun kuvaaja on kokeen alussa hetken aikaa lähes lineaarinen, mutta kääntyy varsin pian hidastuvasti kasvavaksi käyräksi.



Kuva 32. Halkaistavalla sellillä havaitut routanousut

Halkaistavalla sellillä suoritetuista routanousukokeista määritetyt routimiskertoimet olivat:

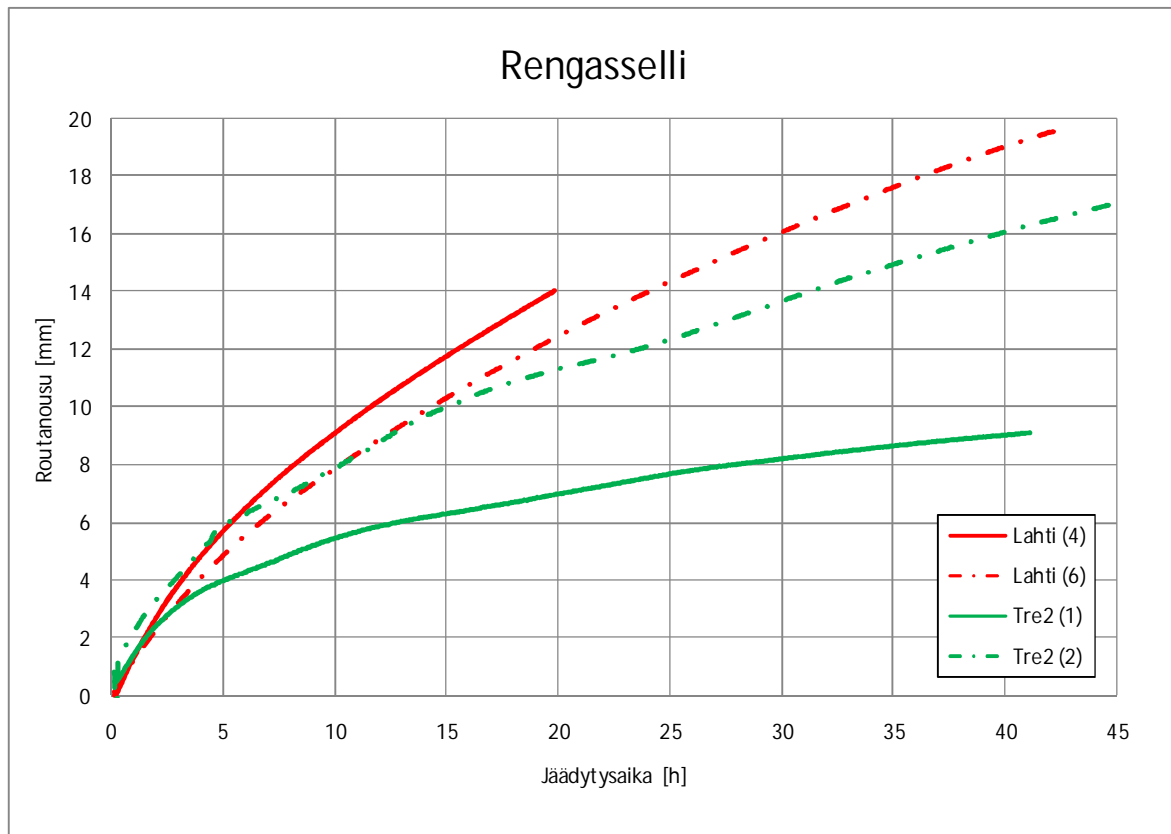
- Lahti (3) 4,9 mm²/Kh 20 jäädytystunnin kohdalla
- Lahti (5) 2,6 mm²/Kh 33 jäädytystunnin kohdalla
- Tre2 (3) 0,7 mm²/Kh 50 jäädytystunnin kohdalla
- Tre2 (4) 0,5 mm²/Kh 65 jäädytystunnin kohdalla.

Maanäytteen Lahti (3) jäädytysaika oli liian lyhyt, joten siitä saatua tulosta ei voitane pitää vertailukelpoisena. Toisaalta näytteiden Lahti (3) (kuva 21) ja Lahti (5) (kuva 22) tulostuskuvaajat vastaavat toisiaan siinä määrin, että maanäytteestä Lahti (5) määritettyä routimiskertoimen arvoa 2,6 mm²/Kh voidaan pitää edustavana tuloksena.

Maanäytteistä Tre2 (3) ja Tre2 (4) määritetyt routimiskertoimen arvot eivät poikkea toisistaan kovin paljoa. Roudan tunkeutumisyyvydessä oli kuitenkin eroja. Roudan nettosyvyys (roudan syvyys-routanousu, z-h) pysähtyi näytteessä Tre2 (3) (kuva 24) noin 68 mm kohdalle, kun taas näytteessä Tre2 (4) (kuva 26) vastaava arvo oli 78 mm. Suhteellisen routanousun kuvaaja (z/h) tekee molemmissa tulostuskuvaajissa jyrkän nousun ennen tasaantumistaan noin 20 jäädytystunnin kohdalla. Tämä johtuu kokeiden alussa havaituista suurista routanousunopeuksista.

7.4.2 Rengasselli

Rengassellillä havaitut routanousut jäädytysajan suhteen on esitetty kuvassa 33. Rengassellillä havaitut routanousut olivat selvästi suurempia kuin halkaistavalla sellillä havaitut vastaavat. Rengassellillä suoritetuissa kokeissa routanousu ei ollut aivan tasaista, vaan toinen puoli routi enemmän kuin toinen. Hiekasta rakennetuilla näytteillä epätasainen routanousu oli silmin havaittavaa, kun taas siltistä rakennetut näytteet routivat lähes tasaisesti. Routanousun epätasaisuus johtunee siitä, että kyljen eristekappaleisiin jouduttiin tekemään varaus lämpötila-anturien liikevapauden varmistamiseksi. Tämä puolestaan aiheutti sen, että anturien kohdalta sellin kylki oli heikommin eristetty. Lisäksi kansielementin nestekierron putket ja anturit kuormittivat näytteen toista puolta eikä PVC-muovista valmistettu sellirakenne tarjonnut samanlaista tukea kuin teflonista valmistettu halkaistava selli. Halkaistavaa selliä heikompi eristys johti myös mitattujen lämpötila-arvojen suurempiin heilahteluihin. Tämä ilmenee roudan syvyyden, roudan nettosyvyyden ja suhteellisen routanousun käyrien suurempana ”sahausliikkeenä”. Rengassellissä maa-ainesta pääsi varisemaan pois näytteen sulana pysyvistä osasta, mutta määrä ei ollut kuitenkaan huomattava.



Kuva 33. Rengassellillä havaitut routanousut

Routimiskertoimiksi rengassellillä suoritetuista kokeista määritettiin:

- Lahti (4) 14,0 mm²/Kh 20 jäädytystunnin kohdalla
- Lahti (6) 9,8 mm²/Kh 33 jäädytystunnin kohdalla
- Tre2 (1) 2,0 mm²/Kh 40 jäädytystunnin kohdalla
- Tre2 (2) 5,5 mm²/Kh 46 jäädytystunnin kohdalla.

Maanäytteen Lahti (4) jäädytysaika oli liian lyhyt, eikä siitä saatua tulosta voitane pitää vertailukelpoisena. Maanäytteen Lahti (6) tulostuskuvaaja (kuva 27) vastaa melko hyvin maanäytteen Lahti (4) tulostuskuvaajaa (kuva 28), tosin näytteen Lahti (4) routanousunopeus oli hieman suurempi. Näin ollen näytteestä Lahti (6) määritettyä routimiskertoimen tulosta voidaan pitää edustavana arvona. Lisäksi näytteen Lahti (4) esikokeesta määritetty routimiskertoimen arvo 8,9 mm²/Kh vastaa melko hyvin näytteestä Lahti (6) määritettyä tulosta.

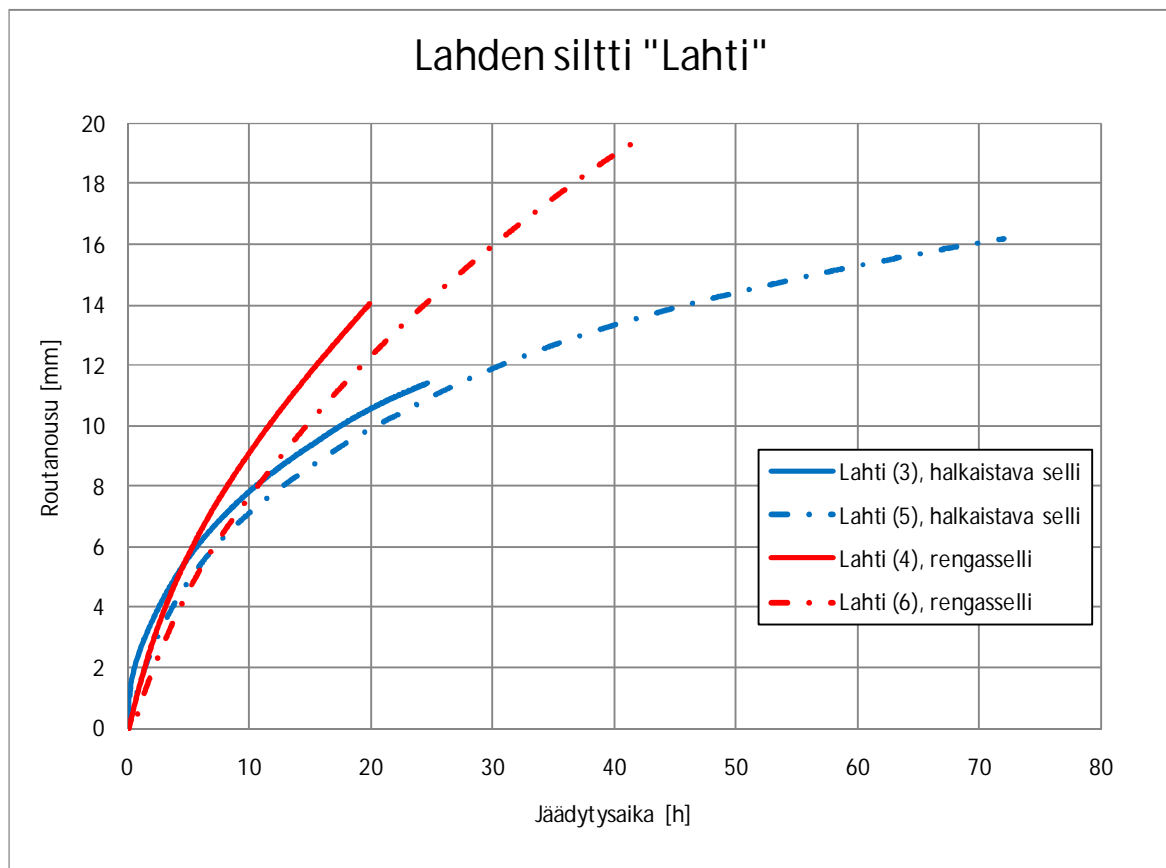
Maanäytteiden Tre2 (1) (kuva 30) ja Tre2 (2) (kuva 31) tulokset poikkesivat toisistaan huomattavasti. Lämpötilaprofiilin stabiili tila saavutettiin molemmissa kokeissa lähes yhtä pitkän jäädytysajan jälkeen, mutta tulosten eroavaisuudet ovat muuten huomattavat. Havaitut routanousut poikkesivat toisistaan paljon. Näytteellä Tre2 (1) oli havaittu 40 jäädytys-

tunnin jälkeen routanousua 9,1 mm, kun vastaava lukema näytteellä Tre2 (2) oli 16,1 mm. Roudan syvyyden ja roudan nettosyvyyden käyrät olivat tästä huolimatta hyvin toisiaan vastaavia. Koska kokeissa havaitut routanousut kuitenkin poikkesivat toisistaan niin paljon, eivät niistä määritetyt routimiskertoimien arvot vastanneet toisiaan. Kokeiden aikainen visuaalinen tarkkailu osoitti routanousun olevan molemmilla näytteillä epätasaista.

7.4.3 Siltti ”Lahti”

Siltille suoritetuissa esikokeissa routanousunopeus oli pienempi kuin varsinaisissa routanousukokeissa. Näytteen tiivistykseen käytetty työmäärä oli kiertotiivistimellä 100 kierrosta 600 kPa:n paineessa. Valmiiden näytteiden tilavuuspainot vaihtelivat välillä 19,3...20,0 kN/m³ ja niiden korkeudet olivat välillä 88,3...93,3 mm. Havaittujen routanousunopeuksien ero ei ollut kuitenkaan huomattava. Routanousunopeus oli esikokeen ja varsinaisen routanousukokeen alussa lähes sama. Varsinaisen kokeen routanousunopeuden hidastuminen oli kuitenkin maltillisempaa. Kuva 19 sivulla 41 esittää routanousukokeen kulkua: kyllästys, esikoe, sulatus ja konsolidaatio sekä routanousukoe. Kuvassa esitetty routanousun käyrä kuuluu maanäytteelle Lahti (4). Kuvasta havaitaan routanousunopeuden olevan hieman suurempi varsinaisessa routanousukokeessa kuin esikokeessa. Näytteet painuivat esikokeen jälkeisessä konsolidaatiossa alkuperäiseen korkeuteensa ja jopa sen alle. Hienojakoisen maa-aineksen voimakkaampi routiminen esikokeen jälkeen johtunee siitä, että esikokeessa routimaan päässyt näyte oli sulatuksen ja konsolidoinnin jälkeen paremmin kyllästynyt kuin ennen esikoetta.

Lahden siltille suoritettujen neljän kokeen routanousuhavainnot on kerätty kuvaan 34. Koestettu materiaali oli geotekniseltä maalajiluokituksestaan siltti ja ISO maalajiluokitukseltaan sandyclayey Silt. Casagranden kriteeriin perustuvan rakeisuuskäyräluokituksen mukaan maalaji luokiteltiin routivaksi. Sen kapillaarinen nousukorkeus oli 2,20 m, joten kappaleessa 6 esitetty taulukko 1 luokittelee maalajin voimakkaasti routivaksi. Routanousukokeista saadut tulokset vahvistavat indeksikokeista saadut määritelmät.



Kuva 34. Siltillä havaitut routanousut

Kokeista määritettyjä routimiskertoimia ei voida suoranaisesti soveltaa taulukossa 1 esitettyihin arvoihin, sillä taulukon 1 raja-arvot koskevat segregatiopotentialia, jonka määritelmä eroaa hieman routimiskertoimen määritelmästä. Ero on kuitenkin melko pieni (noin 10 %).

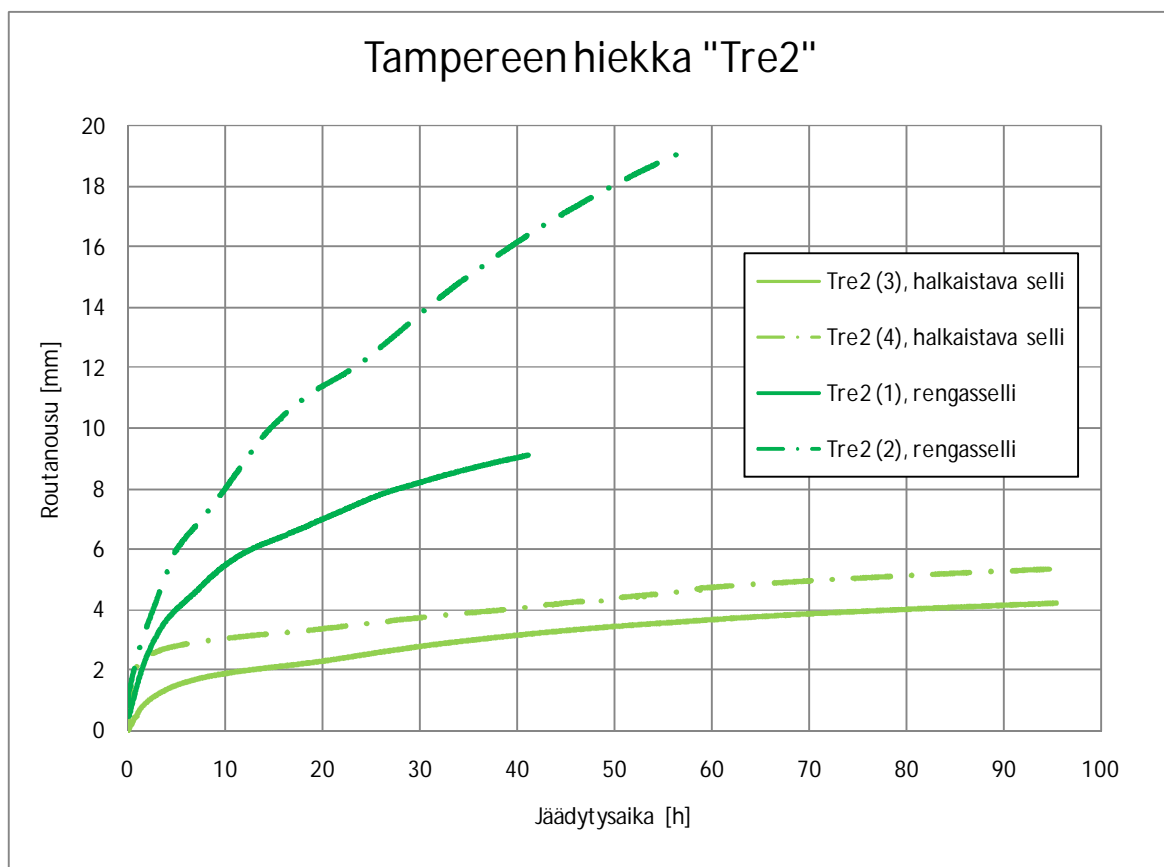
Eri laitteilla määritetyissä routimiskertoimen arvoissa oli kuitenkin huomattava ero. Halkaistavalla sellillä päädyttiin routimiskertoimen arvoon $2,6 \text{ mm}^2/\text{Kh}$, kun taas rengassellillä vastaava tulos oli $9,8 \text{ mm}^2/\text{Kh}$. Sekä halkaistavalla sellillä että rengassellillä suoritettut kokeet onnistuttiin toistamaan varsin hyvin. Routimiskerroin määriteltiin routanousunopeuden ja jäätyneen kerroksen lämpötilagradientin suhteena. Koelaitteiston vaikutus saatuun tulokseen oli näin ollen huomattava.

7.4.4 Hiekka ”Tre2”

Hiekkaisilla maanäytteillä havaittiin esikokeessa suurempi routanousunopeus, kuin varsinaisessa routanousukokeessa. Tiivistämiseen käytetty energia oli kiertotiivistimellä 100 kierrosta 600 kPa:n paineessa. Maanäytteiden tiivistyksen jälkeinen tilavuuspaino oli 18,1...18,6 kN/m³. Esikokeen jälkeisessä konsolidaatiossa näytteet eivät painuneet täysin alkuperäiseen korkeuteensa, vaan jäivät joitain millimetrin kymmenysosia korkeammiksi. Löyhempi näyte aiheutti sen, että routanousu tasaantui nopeammin kuin esikokeessa. Kujala & Ravaska (1989) havaitsivat, että löyhempien näytteiden routanousun kuvaaja taittuu ja tasaantuu nopeammin kuin tiiviillä näytteillä, mutta he eivät löytäneet muuten selvää korrelaatiota näytteen tiiviyyden ja routanousunopeuden välillä.

Hiekasta valmistettujen näytteiden korkeudet vaihtelivat välillä 96...101 mm. Kujalan & Ravaskan (1989) havaintojen mukaan näytteen korkeus vaikuttaa havaittuun routanousuun siten, että lyhyemmät näytteet antavat suuremman routanousun kuin korkeat. Rengassellillä koestetut näytteet olivat lähtökorkeuksiltaan noin 5 mm lyhyempiä kuin halkaistavalla sellillä koestetut näytteet. Korkeusero on kuitenkin niin vähäinen, että sen vaikutus tuloksiin on häviävän pieni.

Tampereen hiekalle suoritettujen neljän kokeen routanousuhavainnot on koottu kuvaan 35. Materiaali oli geoteknisen maalajiluokituksen mukaan hiekka ja ISO maalajiluokituksen mukaan Sand. Materiaalin rakeisuuskäyrä sijaitsee rakeisuuteen perustuvassa routivuusluokittelussa pääosin alueella 2, viitaten näin ollen routimattomaan maalajiin. ISSMFE:n routatoimikunnan suositusten mukaan alueella 2 sijaitsevien maalajien kapillaarisuus tulee kuitenkin tarkistaa ennen kuin se voidaan luokitella routimattomaksi. Hiekalle suoritetuissa kapillaarikokeissa havaittiin 1,40 m kapillaarista nousukorkeutta, joten maalaji on taulukon 1 mukaan lievästi routiva. Routanousukokeista saadut tulokset tukevat indeksikokeista saatua määritelmää.



Kuva 35. Hiekalla havaitut routanousut

Hiekalle suoritetuissa routanousukokeissa tulosten hajonta oli suurempaa kuin siltillä. Halkaistavalla sellillä suoritetuissa kokeissa routarajan tunkeutumissyvyyydessä oli huomattavaa eroa. Rengassellissä puolestaan routanousun kuvaajat ovat varsin erilaiset ja lisäksi routanousu oli epätasaista. Määritettyjen routimiskertoimien keskiarvoiksi saadaan halkaistavalle sellille $0,6 \text{ mm}^2/\text{Kh}$ ja rengassellille $3,75 \text{ mm}^2/\text{Kh}$. Tulosten vaihtelujen vuoksi arvoja voidaan pitää korkeintaan suuntaa antavina. Suuntaus on kuitenkin selvä: rengassellillä määritetyt routimiskertoimet olivat selvästi suurempia kuin halkaistavalla sellillä.

7.4.5 Tulosten yhteenveto

Testimateriaaleille suoritettut routivuusluokitukset on esitetty taulukossa 7. Rakeisuuden mukainen luokitus perustuu ISSMFE:n routatoimikunnan esittämiin rakeisuusalueisiin, jotka on esitetty sivulla 9 kuvassa 1. Hienoainespitoisuuden ($< 0,063 \text{ mm}$) mukainen luokitus perustuu Tiehallinnon (2004) esittämiin lajitepitoisuuden raja-arvoihin. Kapillaarisen nousukorkeuden ja routimiskertoimen mukaiset luokitukset perustuvat sivulla 8 taulukossa 1 esitettyihin ISSMFE:n määrittelemiін raja-arvoihin. Routimiskertoimien arvot ovat teoriassa noin 10 % suurempia, kuin vastaavat segregaatiopotentiaalin arvot. Taulukossa 1 routivuusluokitus on esitetty segregaatiopotentiaalin mukaan. Mikäli tämä ero jätetään huomiotta, saadaan taulukon 7 mukainen vertaus koetuloksista.

Tiehallinto esittää suhteellista routanousua vastaavan routaturpoaman arvoja lähteessä ”Tierakenteen suunnittelu”. Routaturpoaman arvot määritetään seulontatuloksista 0,063 mm ja 2 mm seulojen läpäisyprosenttien perusteella. Taulukko, josta routaturpoaman mitoitusarvot käyvät ilmi, on esitetty liitteessä 9.

Taulukossa 7 on verrattu routanousukokeista määritettyjä suhteellisten routanousujen arvoja liitteessä 9 esitettyihin routaturpoaman mitoitusarvoihin. Routaturpoaman arvoiksi on valittu ”märän” tilan arvot. Suhteellisten routanousujen määrittäjäajankohdat vastaavat routimiskertoimien määrittäjäajankohtia. Hiekalle ”Tre2” suhteelliset routanousut on laskettu koetulosten keskiarvona, kun taas siltile ”Lahti” ne on määritetty kelpuutetuista koetuloksista.

Taulukossa 1 esitetty routivuusluokitus routanousunopeuden mukaan perustuu Chamberlainin (1981) kuvaamaan CRREL:n testimenetelmään. Testimenetelmä soveltaa vakioroutaantumisenopeutta ja siinä routimisluokitus tehdään 48 ja 78 jäädytystunnin välillä havaitun routanousunopeuden mukaan, routaantumisenopeuden ollessa noin 13 mm/d. Tässä tutkimuksessa lämpötilojen raja-arvoja pidettiin routaantumisenopeuden sijasta vakioina. Routaantumisenopeus oli tällöin kokeen alussa suurta ja lopussa hidastuvaa. Routivuusluokitus routanousunopeuden mukaan päätettiin jättää tästä syystä tekemättä.

Taulukko 7. Maanäytteiden routivuusluokitukset eri ominaisuuksien mukaan

ROUTIVUUSLUOKITUS							
Näyte	Raekokoja- kauma (ISSMFE TC - 8, 1989)	< 0,063 mm lajite (Tiehallinto, 2004)	Kapillaari- suus (ISSMFE TC - 8, 1989)	Routaturpoama (suhteellinen routanousu) (Tiehallinto, 2004)		Routimiskerroin SP ₀ (ISSMFE TC - 8, 1989)	
				Halkaistava selli	Rengasselli	Halkaistava selli	Rengasselli
Tre2 (hiekkä)	Routimaton (kapillaari- suus tarkistet- tava)	14,30 % Lievästi routiva	1,4 m Lievästi routiva	5,4 % ^{a)} 3 % ^{b)}	16,1 % ^{a)} 3 % ^{b)}	0,6 mm ² /Kh Lievästi routiva	3,75 mm ² /Kh Erittäin routiva
Lahti (siltti)	Routiva	70,70 % Erittäin routiva	2,2 m Erittäin routiva	17,3 % ^{a)} 16 % ^{b)}	22,5 % ^{a)} 16 % ^{b)}	2,6 mm ² /Kh Keskinkertai- sesti routiva	9,8 mm ² /Kh Erittäin routiva

a) Routanousukokeista määritetty suhteellinen routanousu (määritetty samana ajankohtana kuin SP₀)

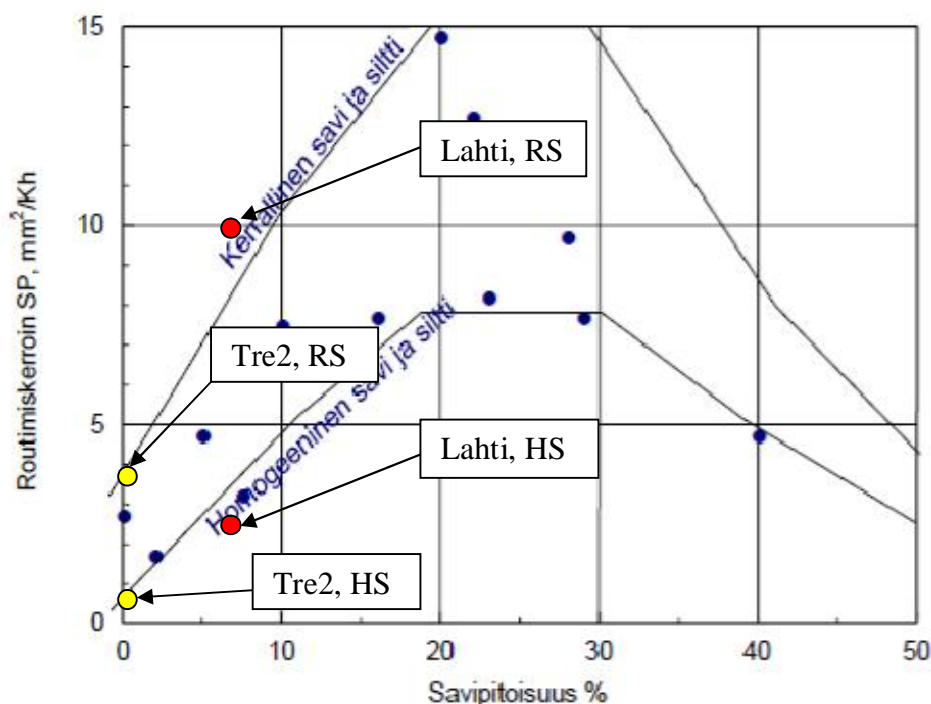
b) Tiehallinnon esittämä routaturpoaman mitoitusarvo < 0,063 mm ja 2mm läpäisyprosenttien mukaan

Halkaistavalla sellillä määritetyt tulokset näyttävät sopivan muiden luokituskokeiden antamiin vertailutuloksiin varsin hyvin. Testimateriaali ”Tre2” luokitellaan lievästi routivaksi hienoainespitoisuuden, kapillaarisuuden ja halkaistavalla sellillä määritetyn routimiskertoimen mukaan. Testimateriaali ”Lahti” puolestaan oli kapillaarisen nousukorkeutensa ja hienoainespitoisuutensa puolesta erittäin routiva ja halkaistavalla sellillä määritetyn routimiskertoimen mukaan keskinäisesti routiva (kun erittäin routivan raja on $3,0 \text{ mm}^2/\text{Kh}$). Routaturpoaman mitoitusarvot ja halkaistavan sellin koetuloksista määritetyt suhteellisten routanousujen arvot ovat molemmilla testimateriaaleilla melko lähellä toisiaan. Testimateriaalille ”Lahti” halkaistavalla sellillä määritetty suhteellinen routanousu 17,3 % vastaa varsin hyvin Tiehallinnon esittämää 16 % mitoitusarvoa. Testimateriaalin ”Tre2” halkaistavalla sellillä määritetty suhteellinen routanousu oli hieman suurempi (5,4 %) kuin mitoitusarvo (3 %). Testimateriaalin ”Tre2” hienoainespitoisuus (0,063 mm seulan läpäisyprosentti) oli 14,3 % ja liitteestä 9 käy ilmi, että se sijoittuu 0,063 mm seulan mukaisten raja-arvojen yläpäähän. 16...30 % hienoainespitoisuutta sisältäville hiekoille routaturpoaman arvo on 12 %.

Rengassellillä tehdyistä kokeista määritellyillä routimiskertoimilla molemmat testimateriaalit luokitellaan taulukon 1 rajojen perusteella voimakkaasti routiviksi. Hiekkaisen testimateriaalin ”Tre2” osalta määritelmä on kuitenkin ristiriitainen muiden luokituskokeiden kanssa. Rengassellillä määritetty suhteellinen routanousu oli testimateriaalilla ”Tre2” 16,1 % kun liitteen 9 mukainen routaturpoaman mitoitusarvo oli vain 3 %.

Siltille ”Lahti” suoritettut indeksikokeet ja routanousukokeet näyttivät kaikki johdonmukaisesti materiaalin olevan routivaa. Rengassellillä tehdyistä kokeista määritetty routimiskerroin oli kuitenkin 3,7 kertaa suurempi kuin halkaistavalla sellillä määritelty. Hiekkalle ”Tre2” suoritettut indeksikokeet ja rengassellillä määritetty routimiskerroin olivat ristiriidassa keskenään. Rengassellillä määritettyjen routimiskertoimien keskiarvo oli 6,25 kertaa suurempi kuin halkaistavalla sellillä määritetty vastaava.

Kuva 36 esittää routimiskertoimen likimääräistä riippuvuutta maalajin savipitoisuudesta eräiden kenttähavaintojen mukaan. Kuvassa esitetyt ylä- ja alarajakäyrät perustuvat havaintoon, että samalla savipitoisuudella homogeenisen saven routimiskerroin on keskimääräistä pienempi, kun taas kerrallisen saven routimiskerroin on keskimääräistä suurempi (Saarelainen, 2001). Kuvaan on sijoitettu eri sellirakenteilla määritetyt routimiskertoimien arvot molemmista testimateriaaleista. Punaiset pisteet edustavat siltistä testimateriaalia ”Lahti” ja keltaiset pisteet hiekkaista testimateriaalia ”Tre2”.



Kuva 36. Routimiskertoimen riippuvuus savipitoisuudesta (Saarelainen, 2001). Kuvaan on lisätty molemmille testimateriaaleille eri sellirakenteilla määritetyt routimiskertoimet, RS = rengasselli, HS = halkaistava selli

Testimateriaalin ”Lahti” savipitoisuus on 7,5 % ja halkaistavalla sellillä määritetty routimiskertoimen arvo 2,6 mm²/Kh sijoittuu hieman kuvassa esitetyn alarajan alapuolelle. Rengassellillä määritetty tulos 9,8 mm²/Kh puolestaan sijoittuu kuvassa esitetyn ylärajan yläpuolelle. Testimateriaalin ”Tre2” savipitoisuus on 1,1 % ja halkaistavalla sellillä määritetty routimiskerroin 0,6 mm²/Kh sijoittuu alemmalle rajakäyrälle. Rengassellillä määritetty routimiskerroin 3,75 mm²/Kh sijoittuu puolestaan ylemmälle rajakäyrälle. Yleisesti ottaen halkaistavalla sellillä määritetyt tulokset näyttävät myötäilevän kuvaajassa esitettyä alarajakäyrää ja rengassellillä määritetyt tulokset yläraajakäyrää.

8. JOHTOPÄÄTÖKSET

Laboratoriokokeissa määritettävä routimiskerroin on erittäin herkkä koejärjestelyjen vaikutuksille. Samalla työmäärällä tiivistetyt, homogeeniset näytteet routivat rengassellissä voimakkaammin kuin halkaistavassa sellissä. Rengassellillä määritetyt routimiskertoimet olivat 4...6 kertaa suurempia kuin halkaistavalla sellillä määritetyt routimiskertoimet. Laitteiden antamien tulosten erojen tilastollinen käsittely vaatisi laajan koesarjan, joka ei tämän työn puitteissa ollut mahdollista.

Samaan havaintoon ovat aiemmissa tutkimuksissa päätyneet myös mm. Hasson & Irwin (1988) ja Nurmikolu (2005). Hasson & Irwin testasivat neljää eri sellirakennetta ja havaitsivat rengassellin tuottavan suurimman routanousun identtisillä testimateriaaleilla. He myös totesivat, että ylöspäin laajenevaksi kartioksi rakennettu rengasselli ei tuottanut suurempaa routanousua kuin tavallinen rengasselli. Nurmikolu koesti murskattua kiviainesta, joka sisälsi noin 10 % hienoaainesta ja havaitsi, että sellin rengasjako vähentää huomattavasti routanousua rajoittavaa kitkan vaikutusta ja rengassellillä mitatut routanousut olivat 2-4 kertaa suurempia kuin yhtenäisellä sellirakenteella mitatut routanousut.

Halkaistavalla sellillä määritetyt routimiskertoimet näyttävät sopivan paremmin indeksikokeista saatuihin routivuusluokituksiin kuin rengassellillä määritetyt routimiskertoimet. Halkaistavalla sellillä määritetyt suhteelliset routanousut vastasivat myös varsin hyvin Tiehallinnon esittämiä routaturpoaman mitoitusarvoja. Rengassellillä määritetyt tulokset puolestaan viittaavat suurempaan routimisalttiuteen kuin indeksikokeet. Rengassellin ja halkaistavan sellin ero luokituskokeisiin verrattaessa käy ilmi erityisesti routivan ja routimatoman maalajin välimaastossa olevalla testimateriaalilla ”Tre2”.

Savipitoisuuden ja routimiskertoimen välisen riippuvuuden kuvaajaan (kuva 36) lisätyt rengassellin koetulokset sijoittuvat kuvassa esitetylle ylemmälle rajakäyrälle, kun taas halkaistavalla sellillä määritetyt arvot sijoittuvat alemmalle rajakäyrälle. Koetulosten perusteella voidaan siis olettaa, että halkaistavalla sellillä määritetyt routimiskertoimet ovat keskimäärin pienempiä kuin kenttähavaintojen perusteella määritetyt routimiskertoimet. Vastaavasti rengassellillä määritettyjen routimiskertoimien voidaan olettaa olevan keskimäärin suurempia kuin kenttähavaintojen perusteella määriteltyjen routimiskertoimien.

Rengassellirakenteeseen tulee kiinnittää enemmän huomiota, jotta tässä tutkimuksessa kohdatuilta ongelmilta välttyttäisiin. Sellimateriaaliksi voitaisiin valita saksalaiseen tyyliin teflon PVC-muovin sijasta (kuva 6 sivulla 22). Tässä tutkimuksessa rakennetusta rengassellistä mitattiin näytteen kyljen lämpötiloja viidestä paikasta. Vähempikin määrä lämpötila-antureita kykenee tuottamaan tarvittavan tiedon routarajan sijainnista. Mikäli halutaan mitata ainoastaan routanousua, voidaan kylkien anturit jättää kokonaan asentamatta ja näin

ollen koko sellirakenne saadaan eristetyksi yhtä tehokkaasti vaakasuuntaisilta lämpövirtauksilta.

Rengassellillä suoritettavissa kokeissa näyte tiivistetään aina sellin sisään. Tämä tarkoittaa sitä, että rengasselliä ei voida käyttää häiriintymättömien maanäytteiden testaukseen. Hal-kaistavaa selliä voidaan kuitenkin tässä tarkoituksessa edelleen hyödyntää. Kitkan vaikutuksen huomioon ottaminen tulosten käsittelyssä vaatii kuitenkin laajamittaisen lisätutkimuksen.

Mikäli laboratoriossa suoritetuista routanousukokeita saatuja tietoja halutaan käyttää lähtötietona kvantitatiivisissa routanousun kokonaislaskelmissa tai kvalitatiivisissa routimisluokituksissa, tulee yhtenäisestä koelaitteistosta ensin päästä sopuun. Routanousukokeesta saatavaan tulokseen vaikuttavia tekijöitä ovat koelaitteiston ohella myös käytetyt raja-arvot ja näytteen ominaisuudet. Jotta eri puolilla määritetyt tulokset saadaan vertailukelpoisiksi, tulee yhtenäisen ja yleisesti hyväksytyn testauskäytännön kehittämistä jatkaa. CEN TC 227, Working Group 4, Task Group 5 – Frost susceptibility on oivallinen pyrkimys tähän suuntaan. Kirjallisuudessa esitetyt routanousukokeisiin perustuvat routivuusluokitusten raja-arvot tulisi myös tarkistaa mahdollisesti saatavan uuden standardin myötä.

9. LÄHDELUETTELO

Aittomäki, A. (1986). Maan jäätymisen ja sulamisen termofysiikka. *Routa maa- ja pohjarakentamisessa RIL K66-1986* (ss. 5-22). Vammala: SGY ry.

Chamberlain, E. J. (1981). *CRREL Monograph 81-2. Frost susceptibility of soil. Review of index tests*. Hanover, New Hampshire: U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL). 121 s.

Friberg, P., Slunga, E. (1989). *Maalajien routivuuskriteerien kehittäminen*. Teknillinen korkeakoulu, Rakennetekniikan laitos. Espoo: TKK. 130 s.

GLO-85. (1985). *Geotekniset laboratorio-ohjeet*. Vammala: SGY ry. 117 s.

Hasson, P., Irwin, I. (1988). Comparison of Freezing Cells Used in the Determination of Soil Frost Susceptibility. *Geotechnical Testing Journal* , 11 (3), ss. 218-220.

Helander, R. (1986). Maapohjan lämpötekniiset mitoituslaskelmat. *Routa maa- ja pohjarakentamisessa RIL K66-1986* (ss. 23-66). Vammala: SGY ry.

Horvli, I. (2008). *Frost heave tests used in Europe and some selected test procedures from US - Overview of test procedure characteristics and evaluation*. TG5, Frost susceptibility - Document TG5/N2. 3 s.

ISSMFE TC - 8. (1989). Work report 1985 - 1989. *Frost in geotechnical engineering. 1*, ss. 15-70. Espoo: VTT.

Kersten, M. S. (1952). Thermal properties of soils. *Frost Action in Soils. Publication 213*, ss. 161-166. Washington D. C.: National academy of sciences - National research council.

Konrad, J.-M. (2000). Assessment of subgrade frost susceptibility from soil index properties. Teoksessa J.-F. Thimus (Toim.), *Ground Freezing 2000* (ss. 89-94). Rotterdam: A.A.Balkema.

Konrad, J.-M. (1994). Sixteenth Canadian Geotechnical Colloquium: Frost heave in soils: concepts and engineering. *Canadian Geotechnical Journal* , 31 (2), ss. 223-245.

Konrad, J.-M., Morgenstern, N. (1980). A mechanistic theory of ice lens formation in fine grained soil. *Canadian Geotechnical Journal* , 17 (4), ss. 473-486.

Konrad, J.-M., Morgenstern, N. (1981). The segregation potential of a freezing soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 18 (4), ss. 482-491.

Koskinen, J. (1998). *Tiedonkeruu ja käsittely routanousukokeessa*. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto. Espoo. 58 s.

Kujala, K. (1991). *Factors affecting frost susceptibility and heaving pressure in soils*. PhD Thesis. University of Oulu, Department of Civil Engineering. Oulu. 99 s.

Kujala, K. (1994). *Routanousun mallintaminen: Kirjallisuusselvitys*. Tielaitoksen tutkimuksia 2/1994. Oulu: Tielaitos, Geokeskus, Oulun kehitysyksikkö. 135 s.

Kujala, K., Ravaska, O. (1989). Influence of test conditions and equipment on frost heave test. *Frost in geotechnical engineering*. 2, ss. 931-944. Espoo: VTT.

Lahtinen, P. (2001). *Fly Ash Mixtures as Flexible Structural Materials for Low-Volume Roads*. Thesis for the degree of Doctor of Technology. Helsinki University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering. Helsinki. 95 s.

Lainpelto, V. (1998). *Maan lujuusparametrien määrittäminen kiertotiivistimellä*. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan osasto. Espoo. 83 s.

Nieminen, P. (1987). Routivuuden määrittäminen. *Routa ja rakentaminen, Geotekniikanpäivä 1986* (ss. 87-98). Mänttä: SGY ry.

Nurmikolu, A. (2005). *Degradation and Frost Susceptibility of Crushed Rock Aggregates Used in Structural Layers of Railway Track*. Thesis for the degree of Doctor of Technology. Tampere University of Technology, Department of Civil Engineering. Tampere. ss. 85-90, 133-167.

Onninen, H. (2001). *Routanousukoe. Routimiskertoimen (SP) määrittäminen laboratoriossa. Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma, Menetelmäkuvaus TPPT 6*. Espoo: VTT. 11 s.

Ravaska, O. (2009). Rak-50.1119 Geomekaniikan perusteet. *Opetusmoniste. Osa B*. Espoo: TKK.

RIL 121-1988. (1988). *Pohjarakennusohjeet 1988*. Vammala: RIL ry. 92 s.

Saarelainen, S. (1986). Maan routanousun arviointi. *Routa maa- ja pohjarakentamisessa RIL K66-1986* (ss. 67-80). Vammala: SGY ry.

Saarelainen, S. (1992). *Modelling frost heaving and frost penetration in soils at some observation sites in Finland. The SSR model*. Thesis for the degree of Doctor of Technology. Technical Research Centre of Finland, VTT, Road, Traffic and Geotechnical Laboratory. Espoo. 119 s.

Saarelainen, S. (2001). *Routimiskertoimen määrittäminen. Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma, Menetelmäkuvaus TPPT 7*. Espoo: VTT. 13 s.

Tiehallinto. (2004). *Tierakenteen suunnittelu*. Helsinki: Edita Prima Oy. 69 s.

Toikka, K. (1984). *Lahden siltien mekaanisten ominaisuuksien määrittäminen puristuskäyrällä*. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Rakennusinsinööriosasto. Espoo. 77 s.

VTT Yhdyskuntatekniikka. (2007). *Talonrakennuksen routasuojausohjeet*. Helsinki: Rakennustieto Oy. 96 s.

C5G Z Sub Zero OHJAUSKELLON OHJELMOINTI
Eliwell ID974 asetukset

LÄMPÖTILAN ASETTAMINEN





1. Paina SET-nappia kerran
2. "SET"-valikko avautuu
3. Paina SET- nappia uudestaan, termostaatin pyyntiarvo ilmestyy näyttöön
4. Vaihda pyyntiarvoa ylös/alas näppäimillä
5. Näyttö palautuu perustilaansa 15 sekunnin kuluttua





OHJELMOINTI

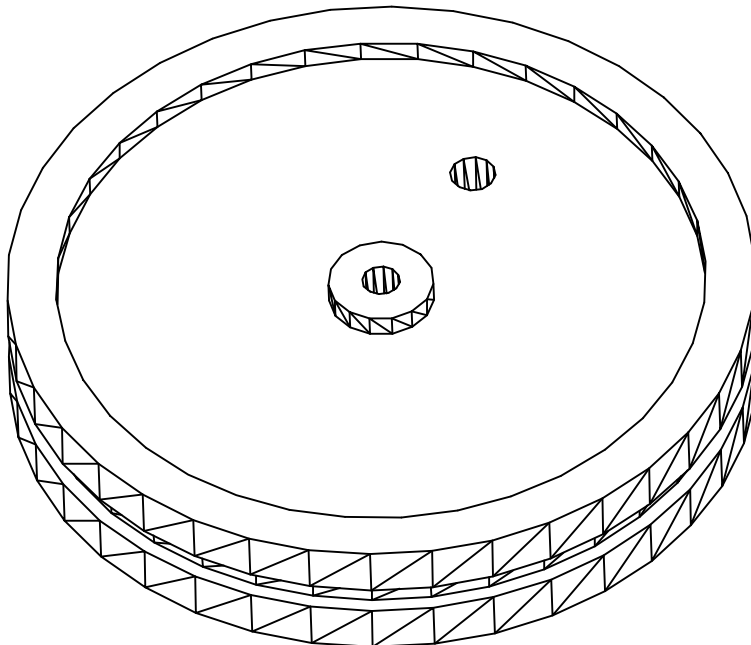
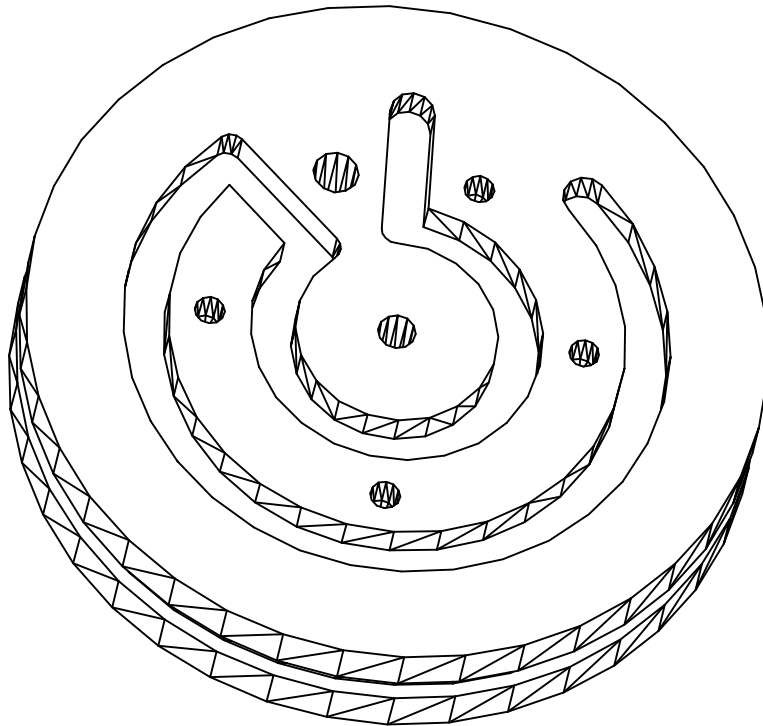
1. Ohjelmointi aloitetaan painamalla n. 5 sekunnin ajan SET-nappia
 2. Ohjauskello pyytää salasanaa, anna salasana (salasana aina 5)
 3. Paina SET-nappia kerran, pääset kansioihin
 4. Valitse kansio ylös/alas-näppäimiä käyttämällä
 5. Paina SET-nappia kerran, niin pääset asetusarvoihin
 6. FNC-näppäimellä pääsee edelliseen kansioon
- Ohjauskello palautuu automaattisesti lämpötilanäyttöön pienen ajan kuluttua

KOHTA	ASETUSARVO	MERKITYS	
kansio "CP"			
dIF	1	differenssi	
HSE	+10	pyynnin yläraja	°C
LSE	1	pyynnin alaraja	°C
Ont	3	anturisuojaus, kompressori pysähtyy anturin hajottua	
Oft	1	anturisuojaus, kompressori pysähtyy anturin hajottua	
dOn	0	kompressorin käynnistyksen viive (0=viive sekunteina)	
dOf	3	kompressorin käynnistyksen suoja-aika	min
dbi	0	peräkkäisten käynnistysten viive	min
OdO	0	kytkentäviive säätimen katkaisun tai virtakatkoksen jälkeen	min
kansio "dEF"			
dtY	0	sulatuksen tyyppi	
dit	10	sulatusten välinen aika	h
dCt	1	sulatusvälin laskenta (1=real time/todellinen aika)	
dOH	0	sulatuksen aloitusviive säätimen käynnistämisestä	min
dEt	10	sulatuksen kesto	min
dSt	+3	sulatuksen lopetuslämpötila	°C
dPO	N	sulatuksen aloitus käynnistettäessä (n=ei)	
kansio "Fan"			
FSt	30	lämpötila jonka yläpuolella puhallin seis (mitataan höyrystimeltä)	
FAd	2	edellisen (FSt) differenssi	°C
Fdt	4	sisäpuhaltimen käynnistyksen viive sulatuksen jälkeen	min
dt	1	kuivausaika sulatuksen jälkeen	min
dFd	Y	sisäpuhallin seis sulatuksen aikana (y=kyllä)	
FCO	N	sisäpuhallin ohjauksen valinta	
kansio "AL"			
AFd	2	hälytyksen differenssi	°C
HAL	+15	ylähälytysraja, sisälämpötilan sallittu poikkeama pyynnin yläpuolella	°C
LAL	-15	alähälytysraja, sisälämpötilan sallittu poikkeama pyynnin yläpuolella	°C
PAO	6	aikaviive hälytyksen toiminnalle laitteen kytkemisestä	h
DAO	60	aikaviive hälytyksen toiminnalle sulatuksen lopetuksesta	min
TAO	5	lämpötila hälytyksen viiveaika	min

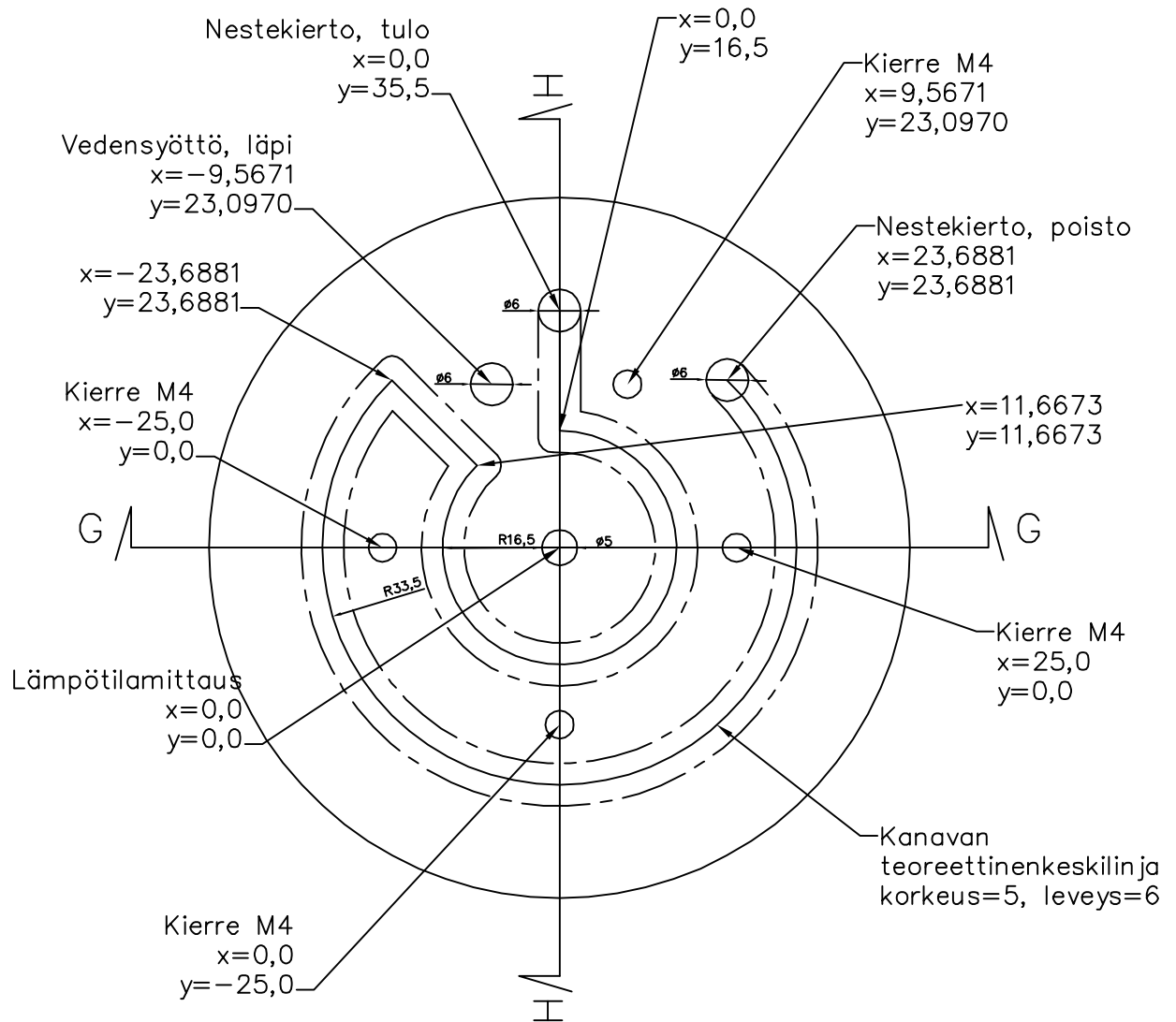
kansio "dis"			
LOC	N	näppäimien lukitus (n=ei)	
PA1	5	tunnussana	
ntd	N	näytön desimaalit (y=kyllä, n=ei, kokonaisluku)	
CA1	0	kalibrointi, sisälämmön ja näytön ero	°C
CA2	0	kalibrointi, höyrystinanturi	
dd1	0	näytön lukitus sulatuksen aikana (1=kyllä)	
dro	0	näytön valinta (0=°C)	
kansio "CnF"			
H00	0	anturin valinta (0=PTC)	
H42	Y	höyrystinanturi käytössä (y=kyllä)	

UP key		Scrolls through the menu items Increases the values Activates manual def. function
DOWN key		Scrolls through the menu items Decreases the values Programmable by parameter
fnc key		ESC function (exit) Programmable by parameter
set key		Accesses the setpoint Accesses the menus Confirms the commands Displaying the alarms (if present)

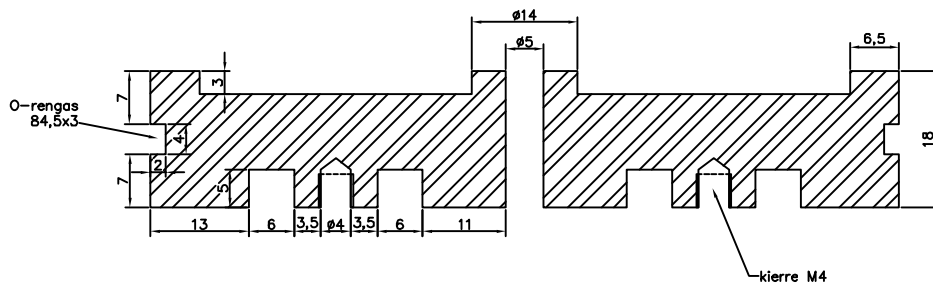
Position	Related Function	Status
	Compressor or relay 1	ON when the compressor is started up; blinking in case of delay, protection or blocked enabling
	Defrost	ON when defrosting; blinking in case of manual enabling
	Alarm	ON when the alarm is enabled; blinking when the alarm is silenced
	Fans	ON when the fan is working



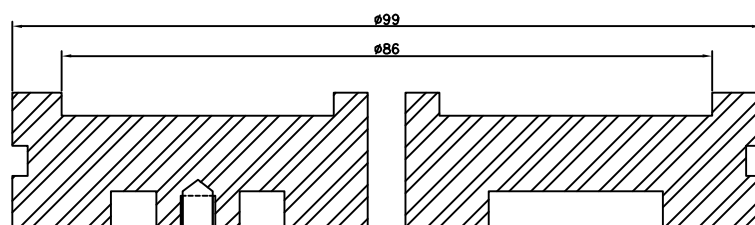
Alumiiniosa
1:1

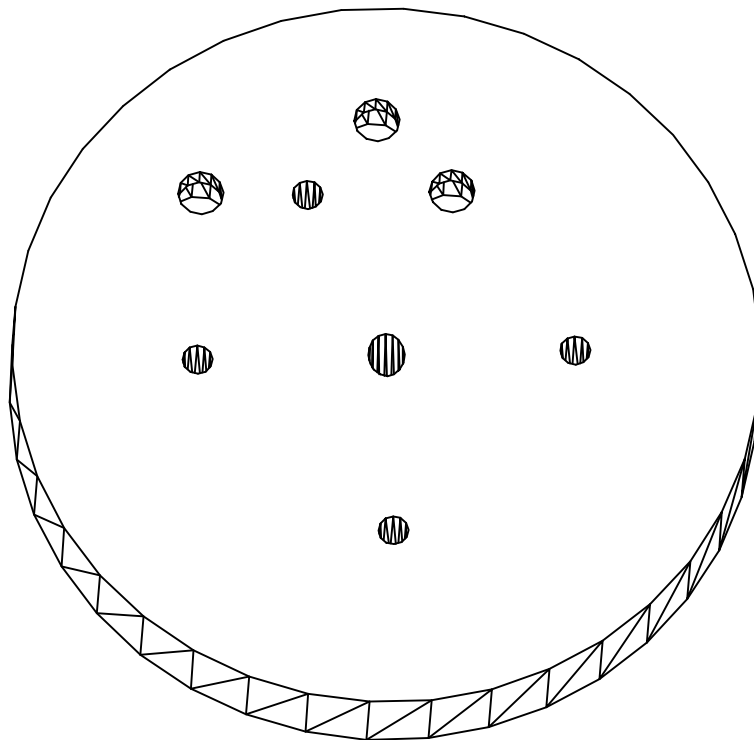
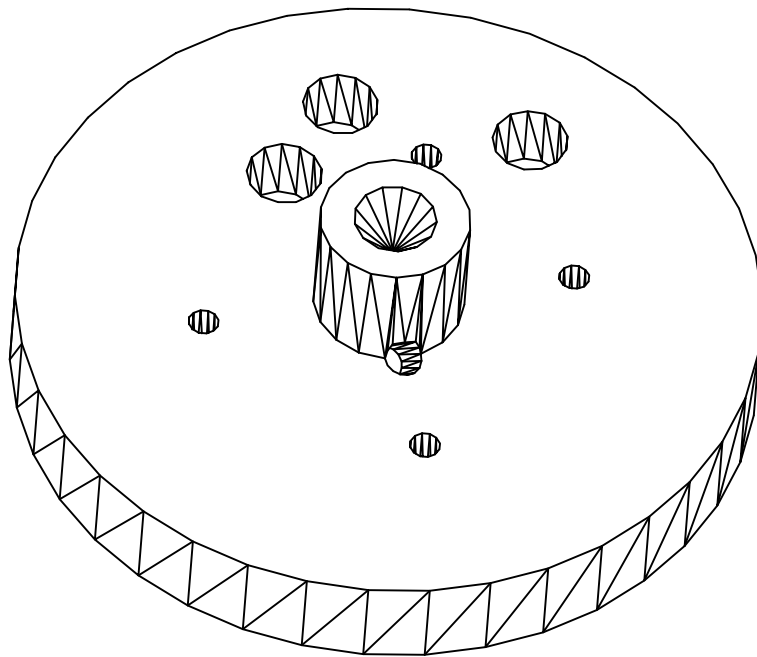


Leikkaus G-G
1:1

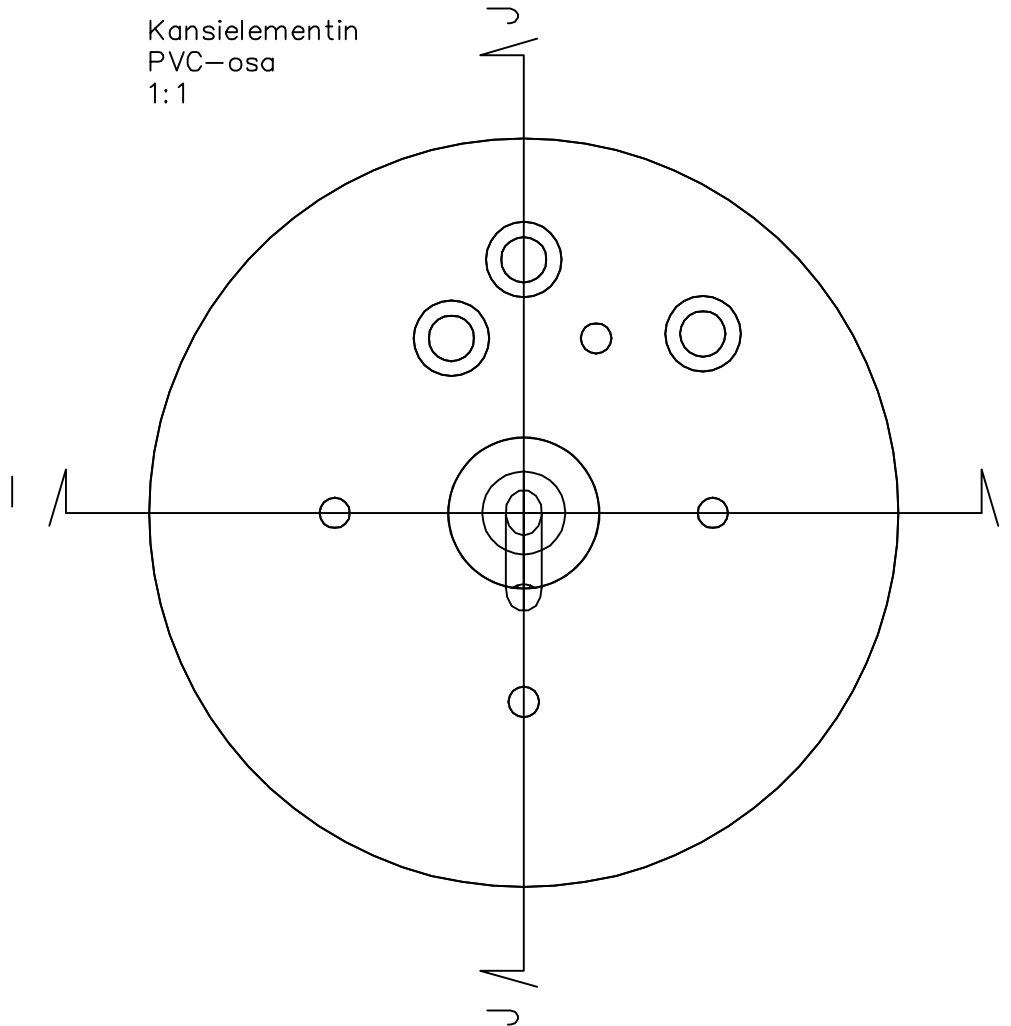


Leikkaus H-H
1:1

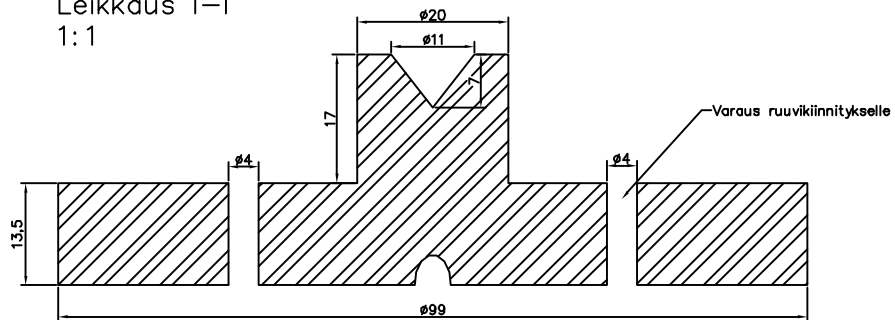




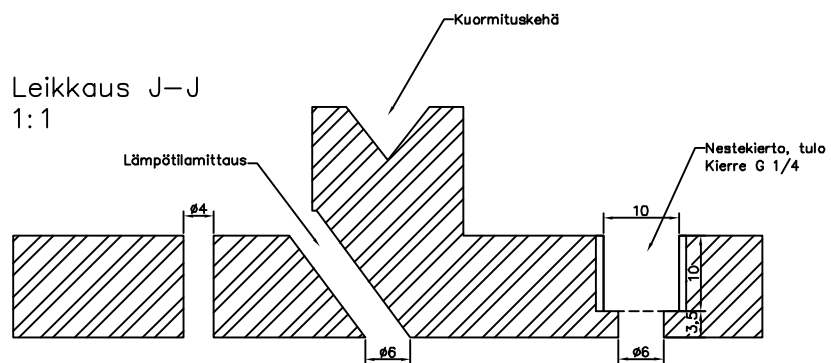
Kansielementin
PVC-osa
1:1

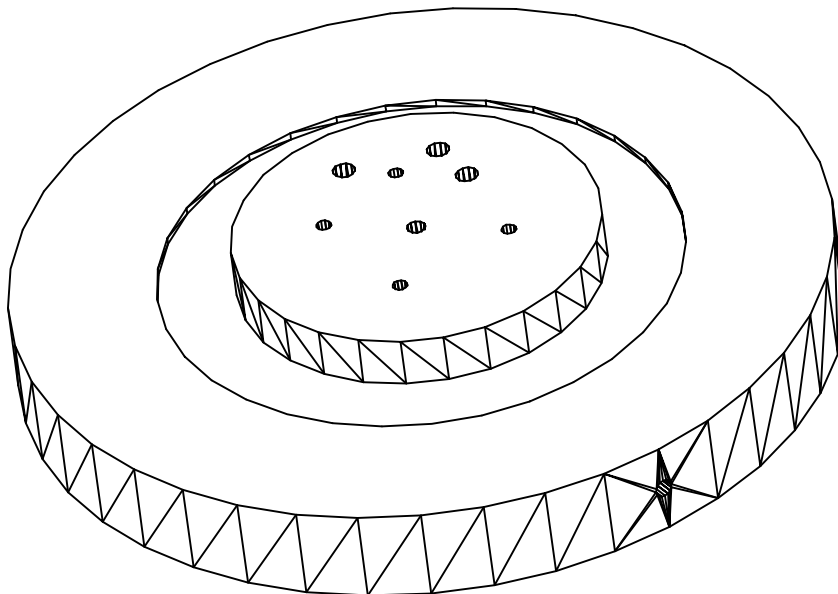
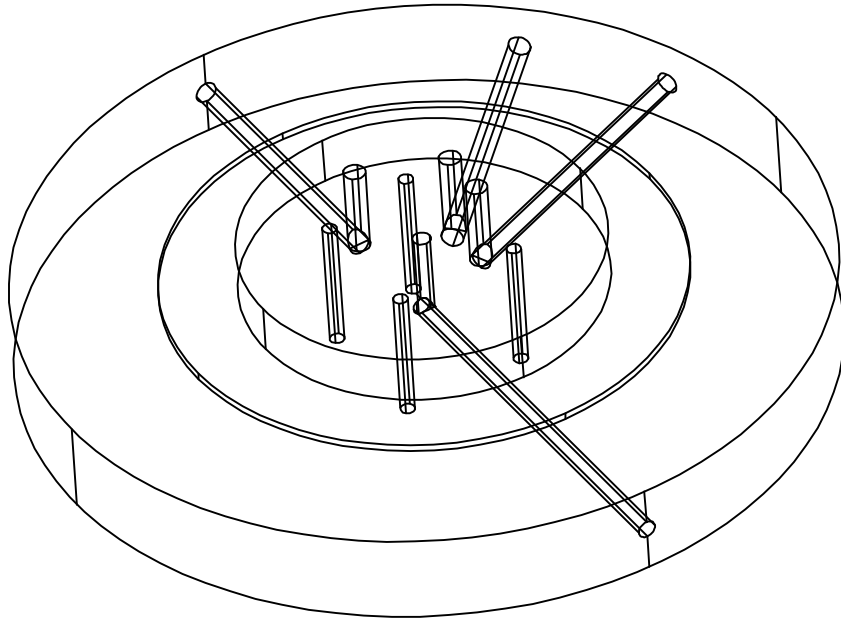


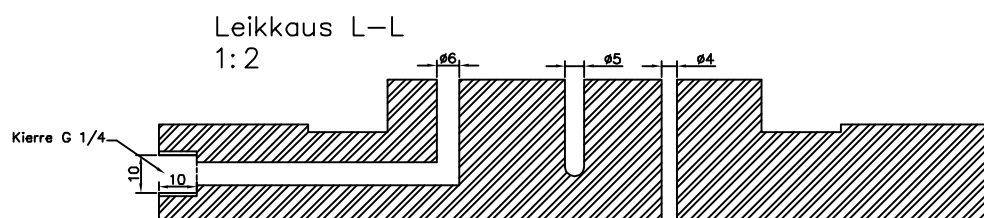
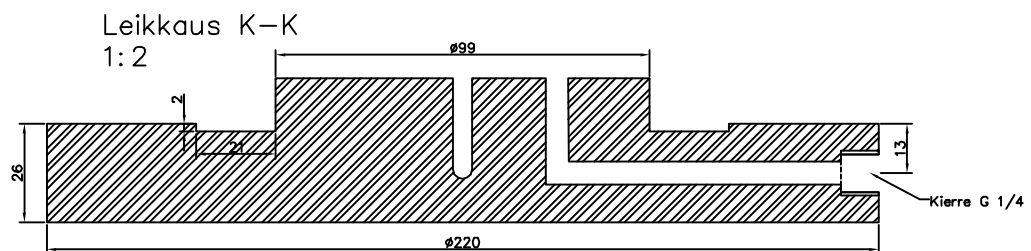
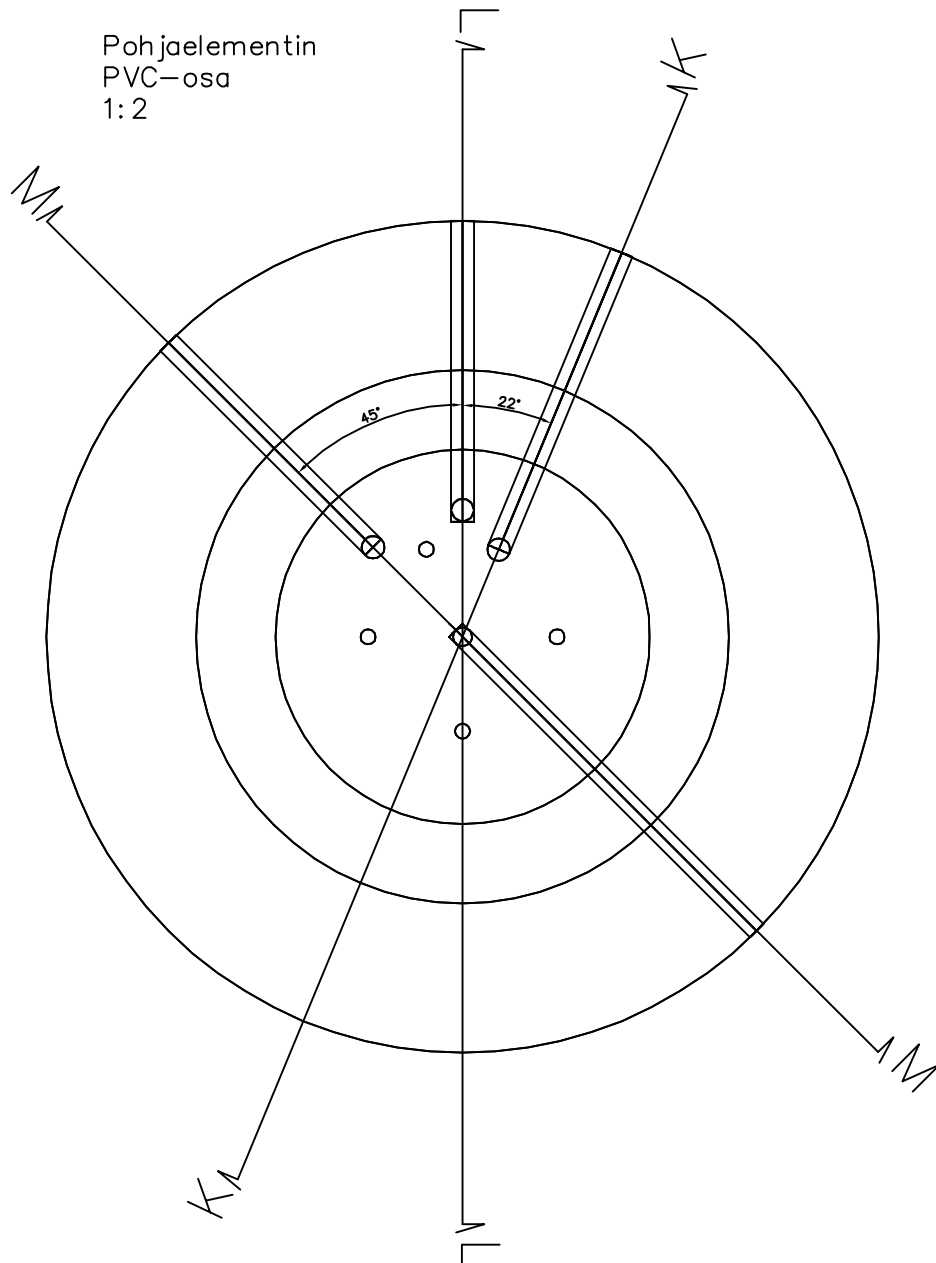
Leikkaus I—I
1:1

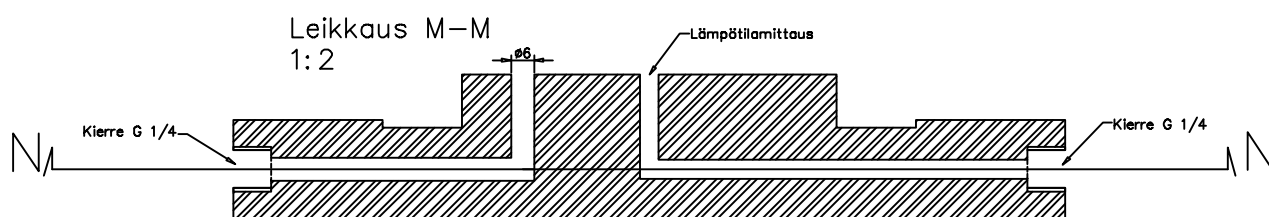


Leikkaus J—J
1:1

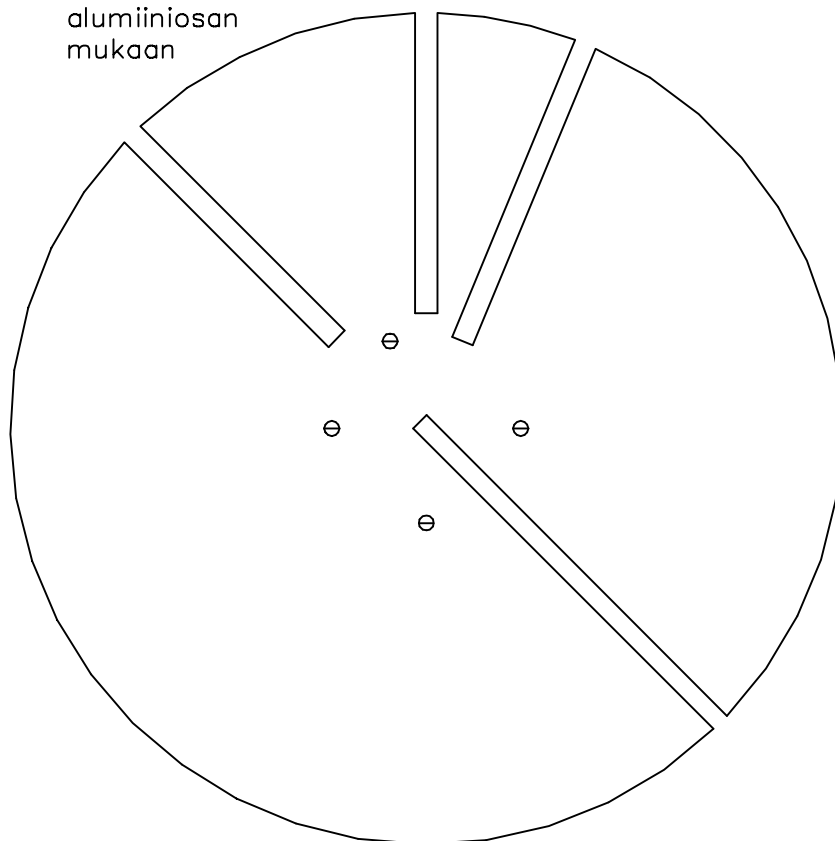


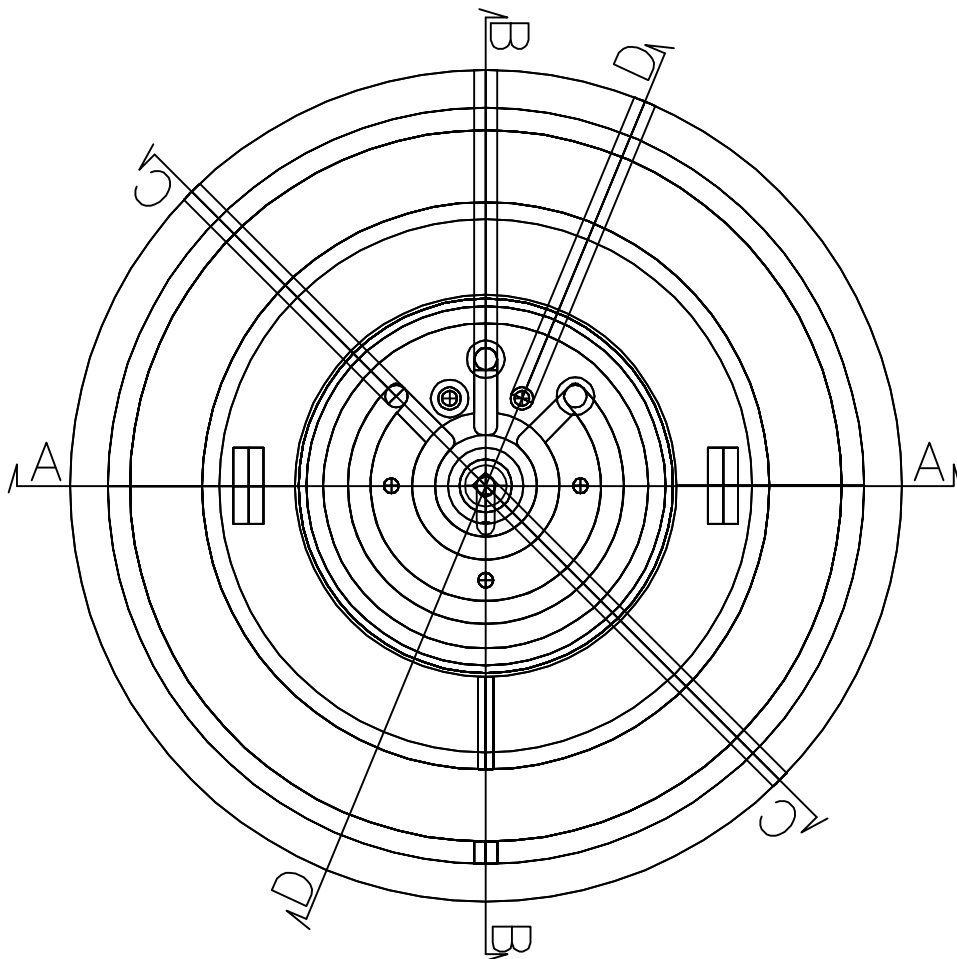
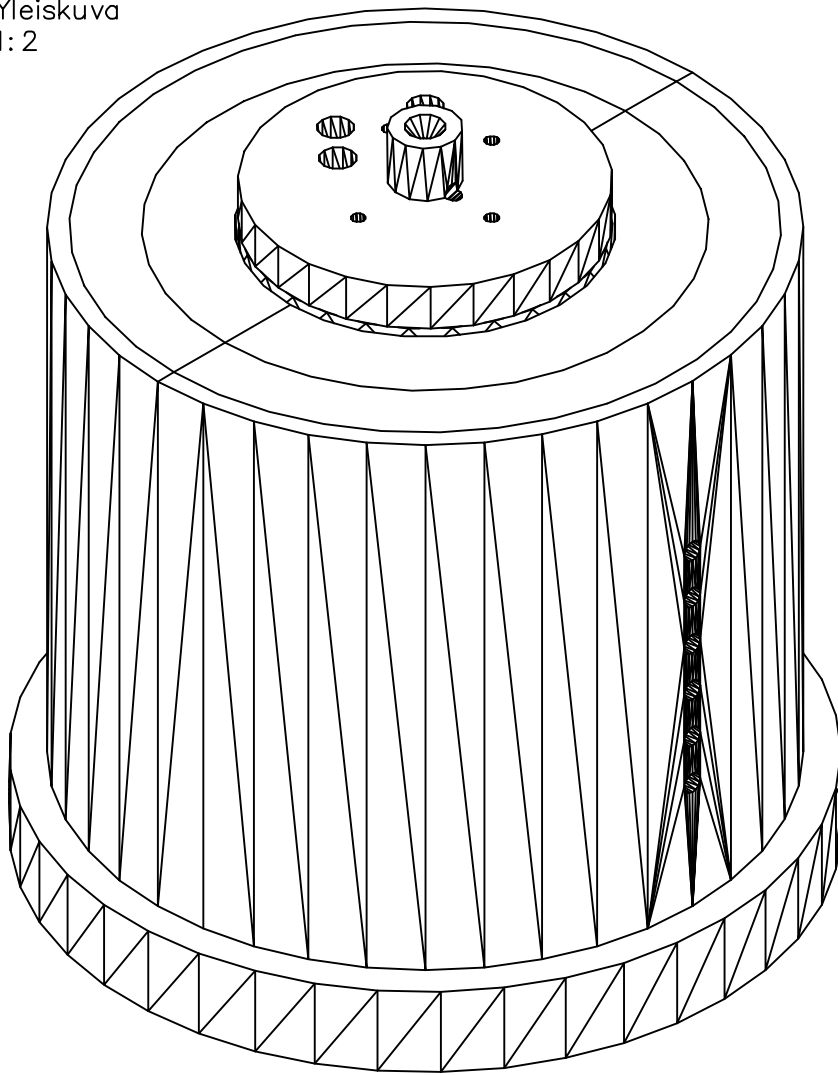


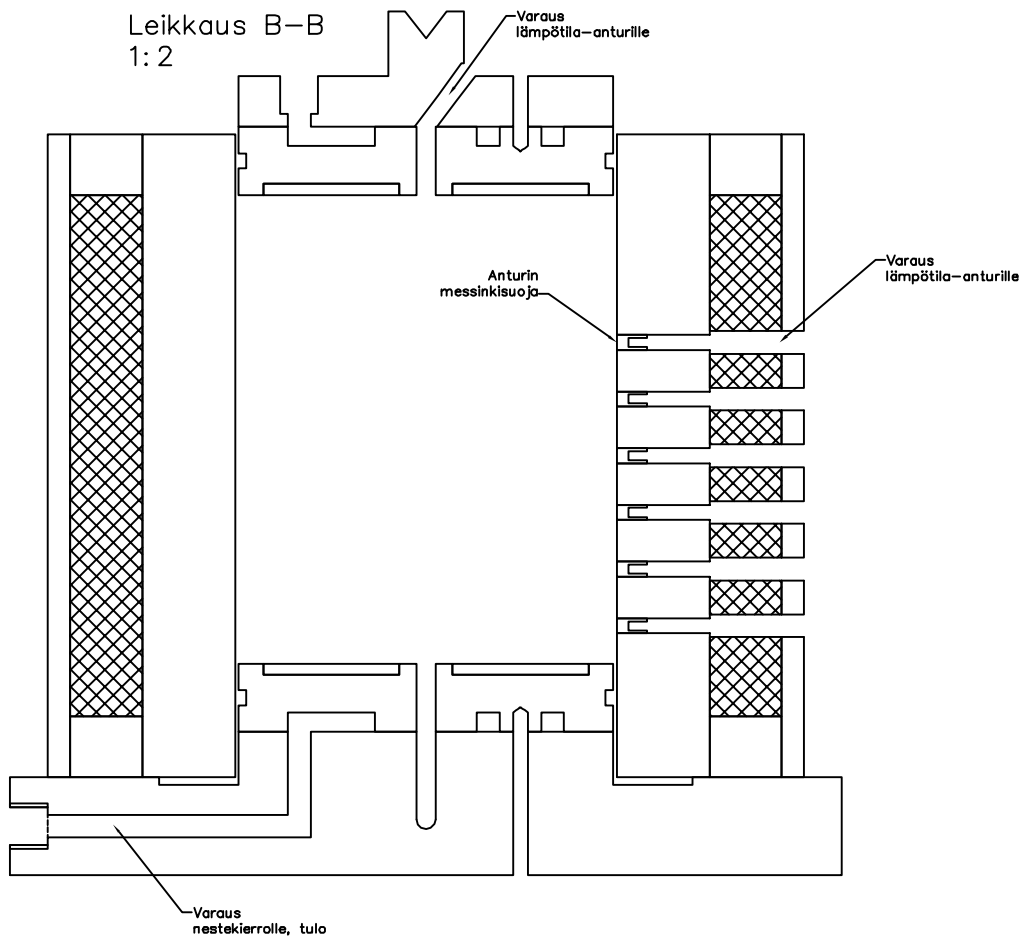
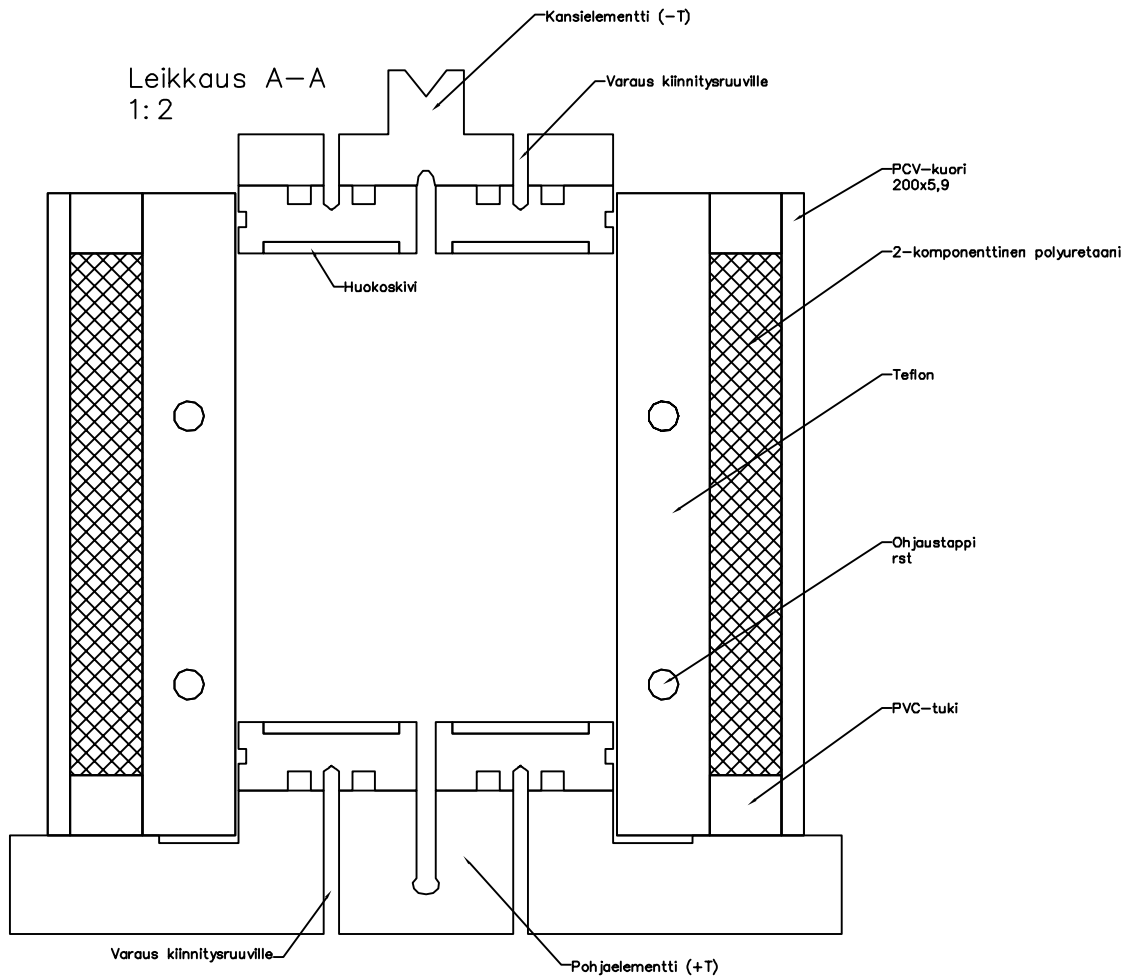


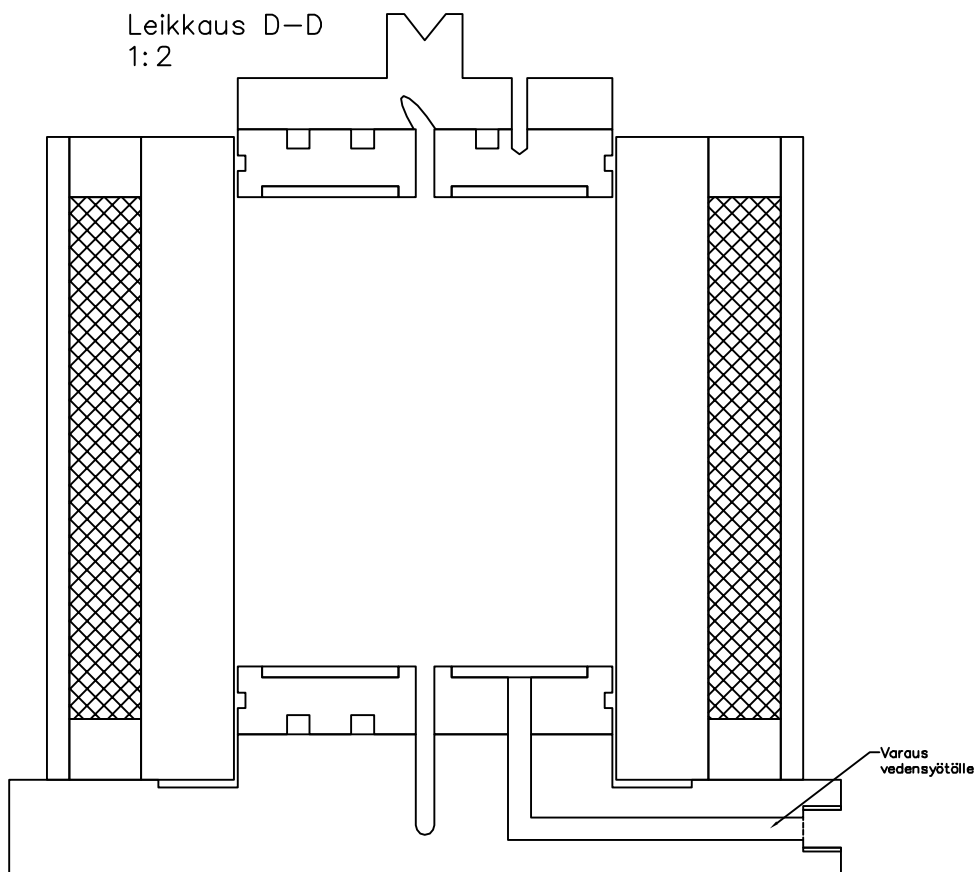
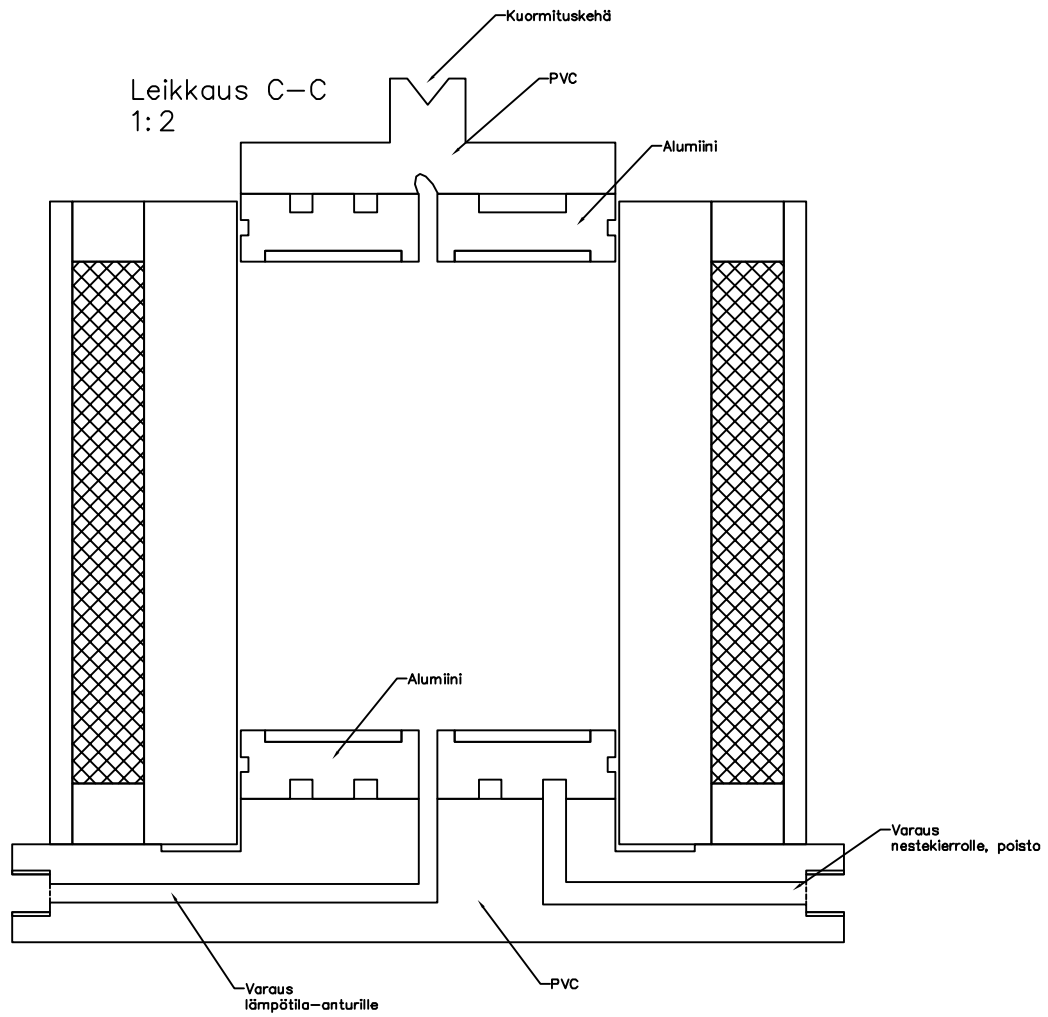


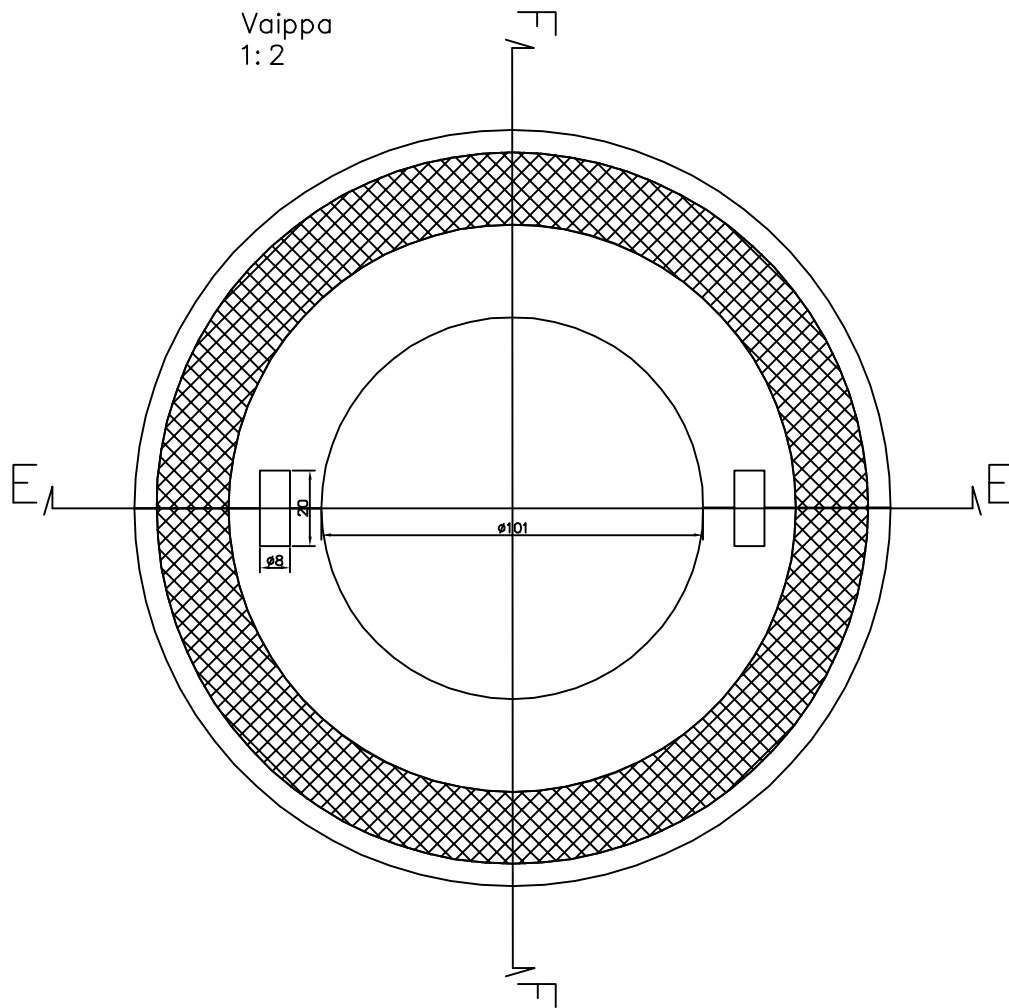
Leikkaus N-N
1:2
Varausten
koordinaatit
alumiiniosan
mukaan



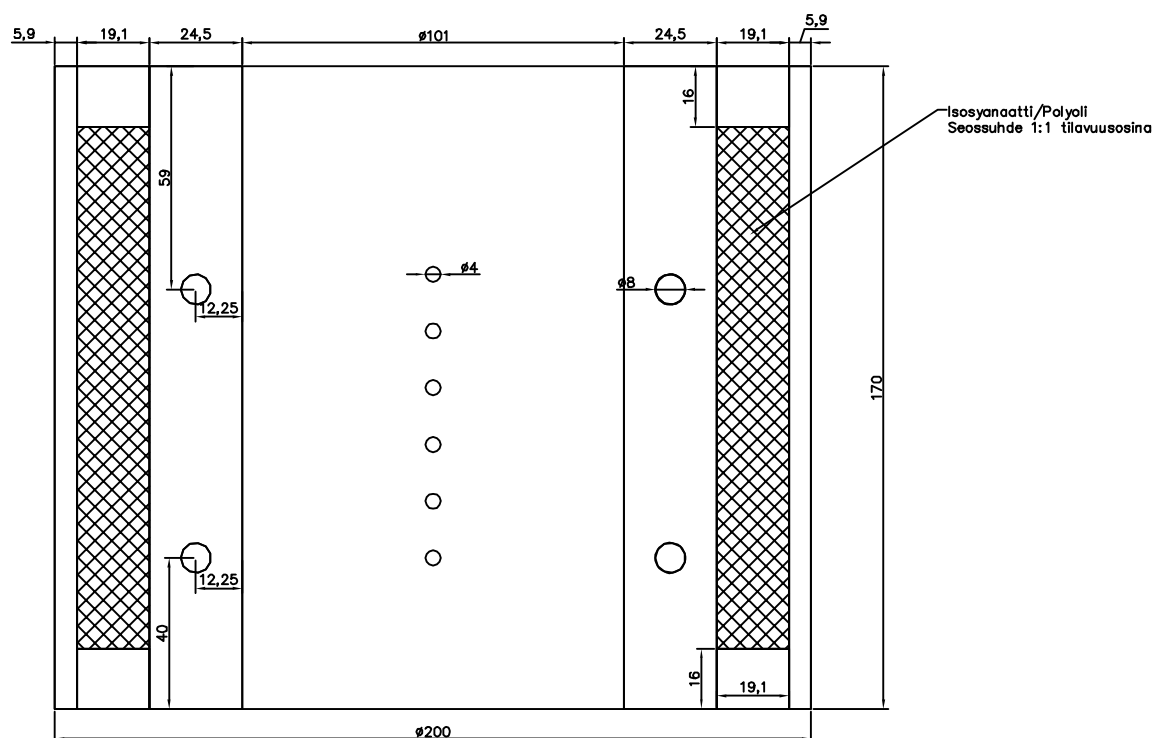




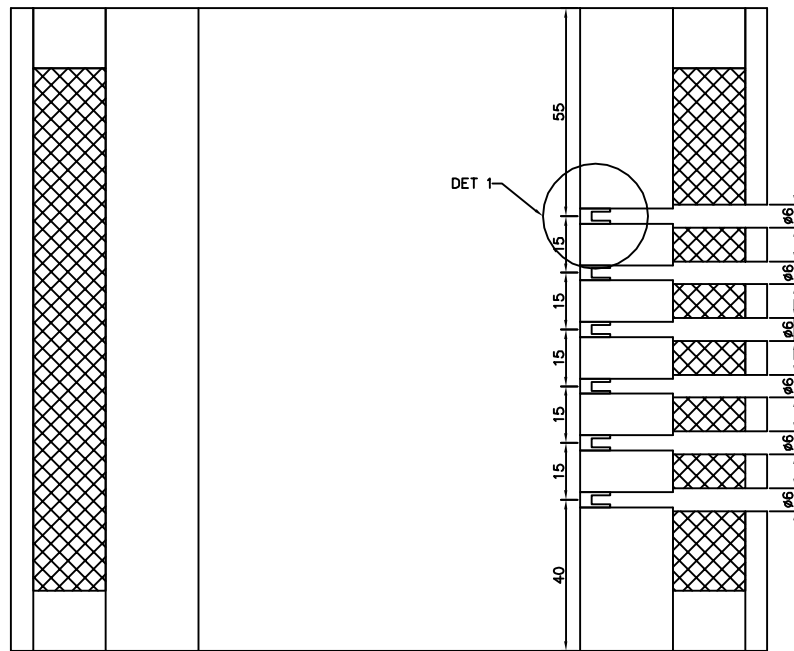




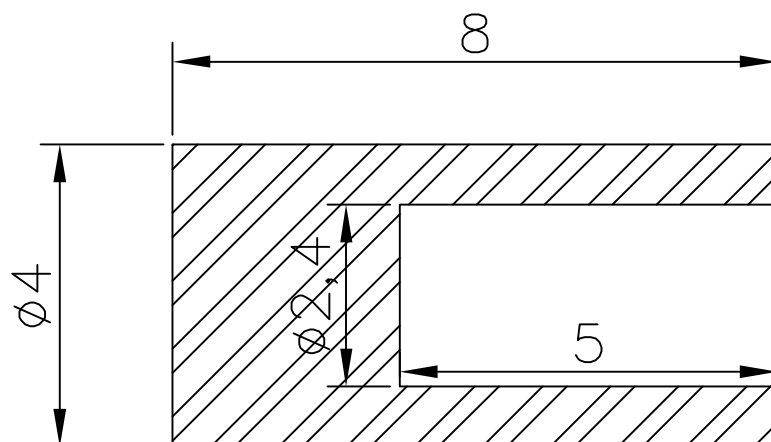
Leikkaus E-E
1: 2

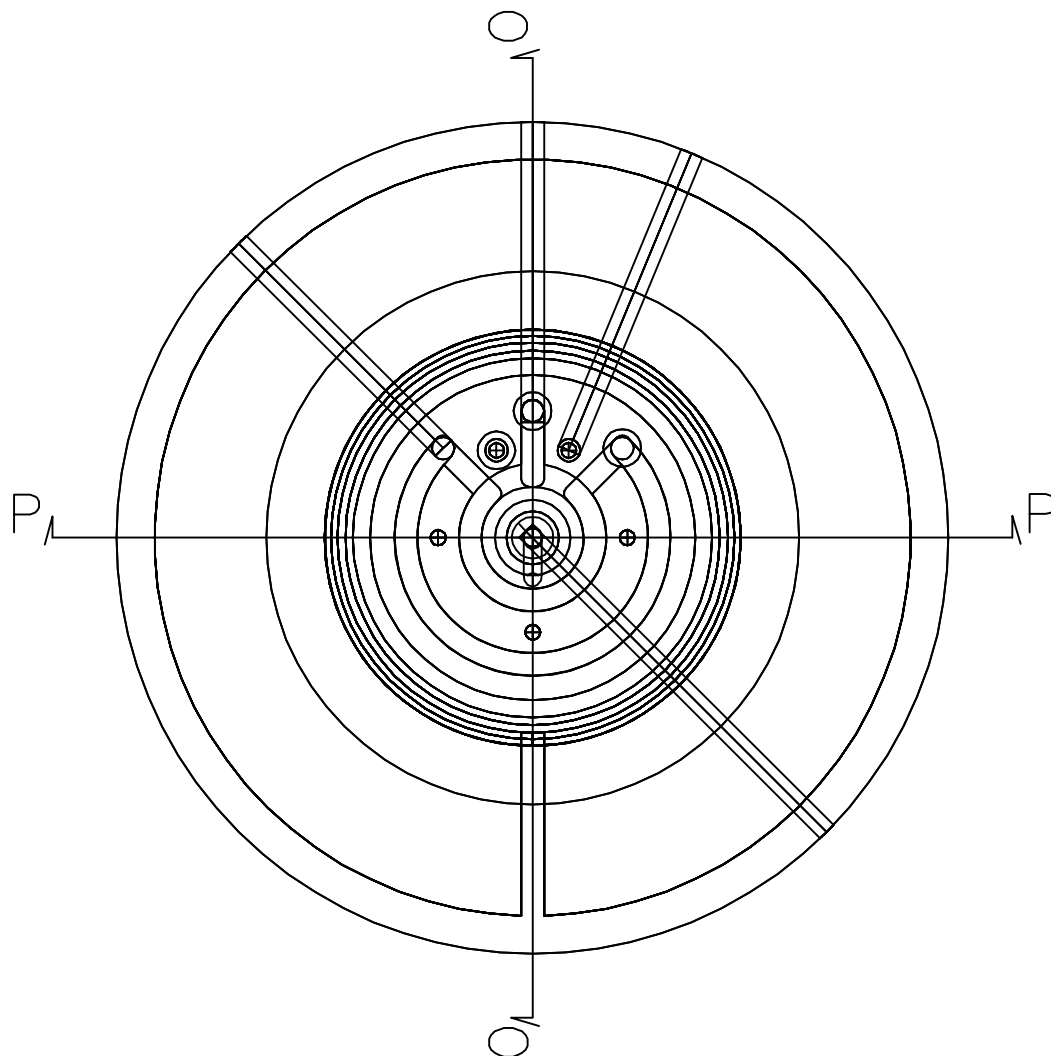
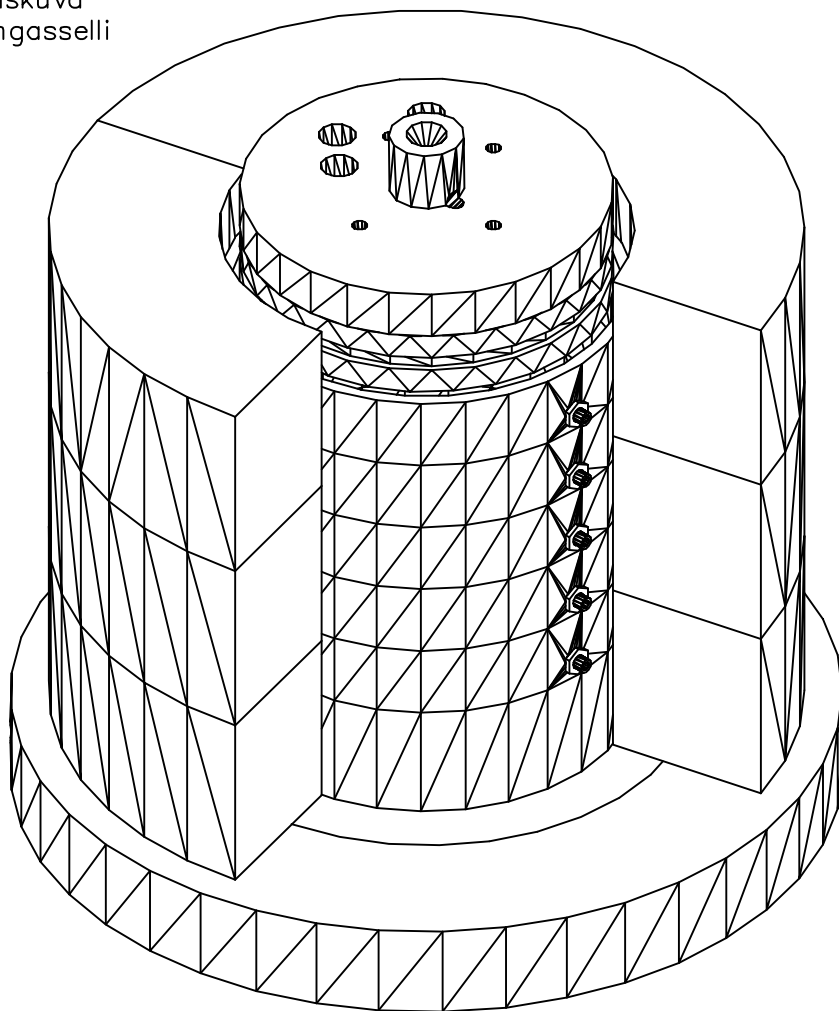


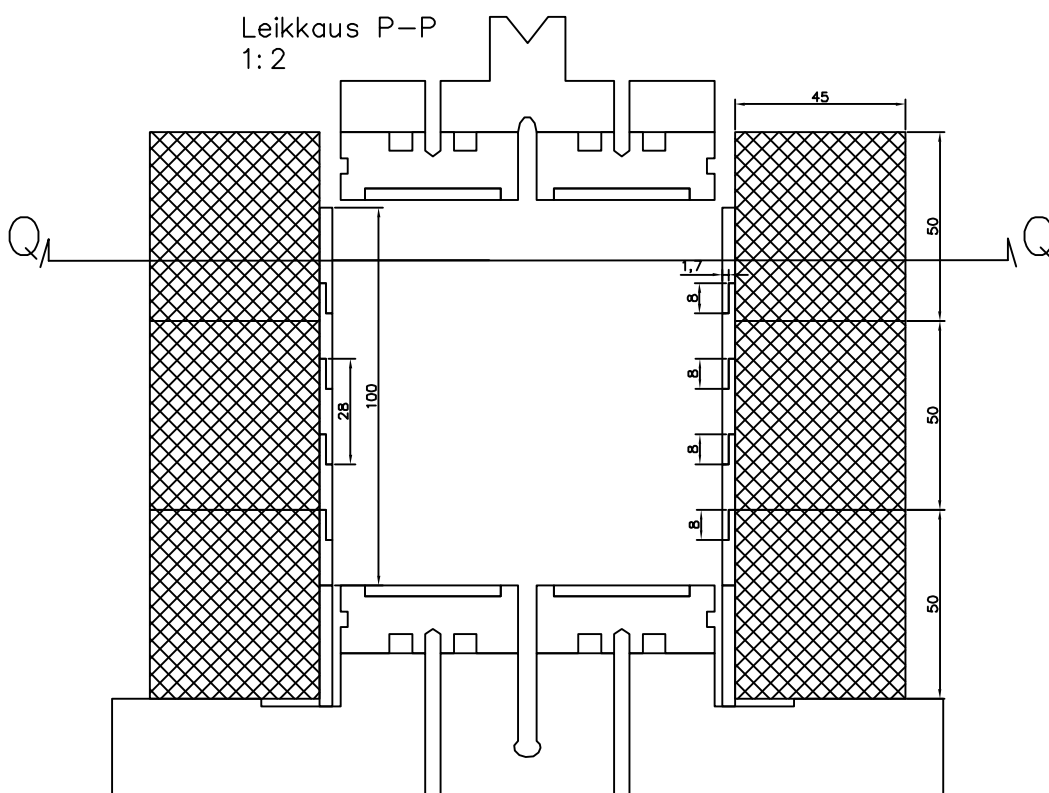
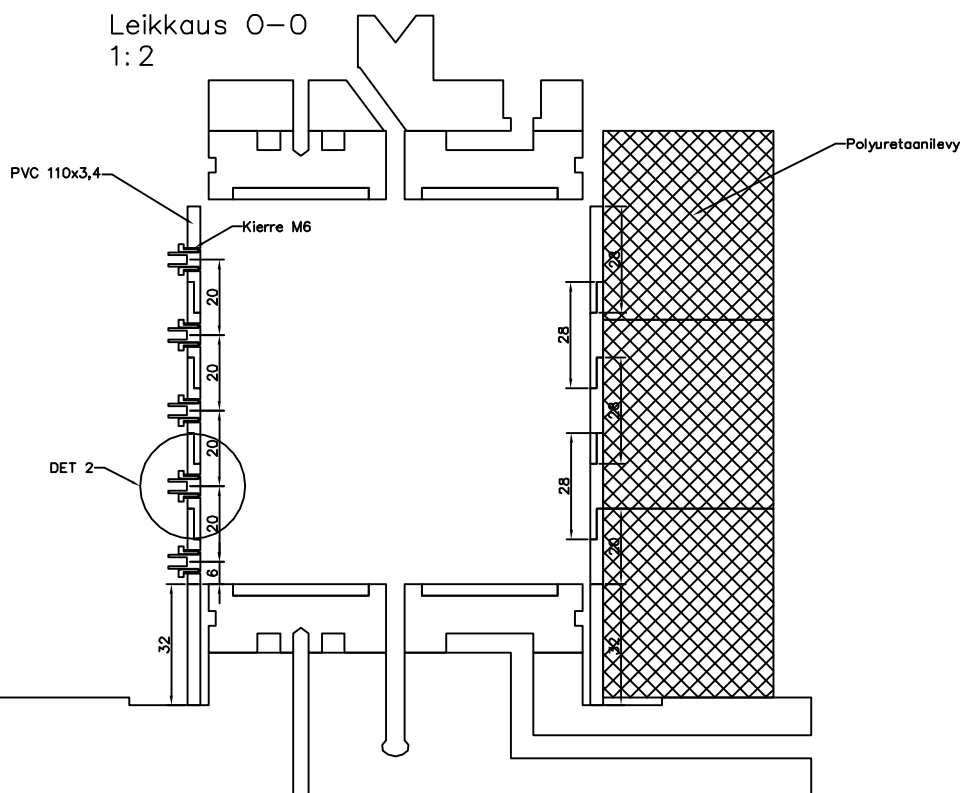
Leikkaus F-F
1:2



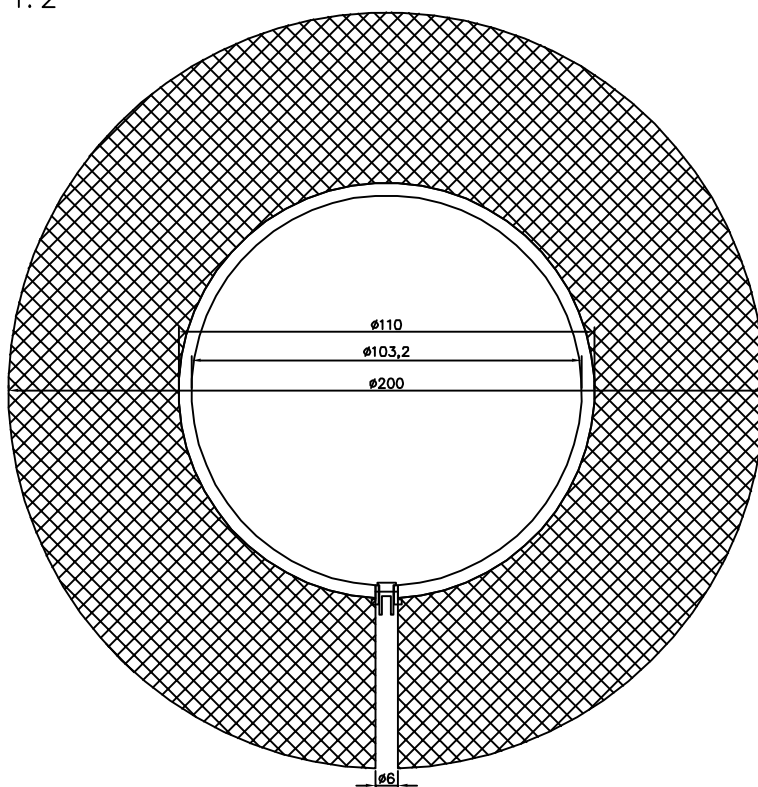
DET 1 Anturin
messinkisuoja
10:1



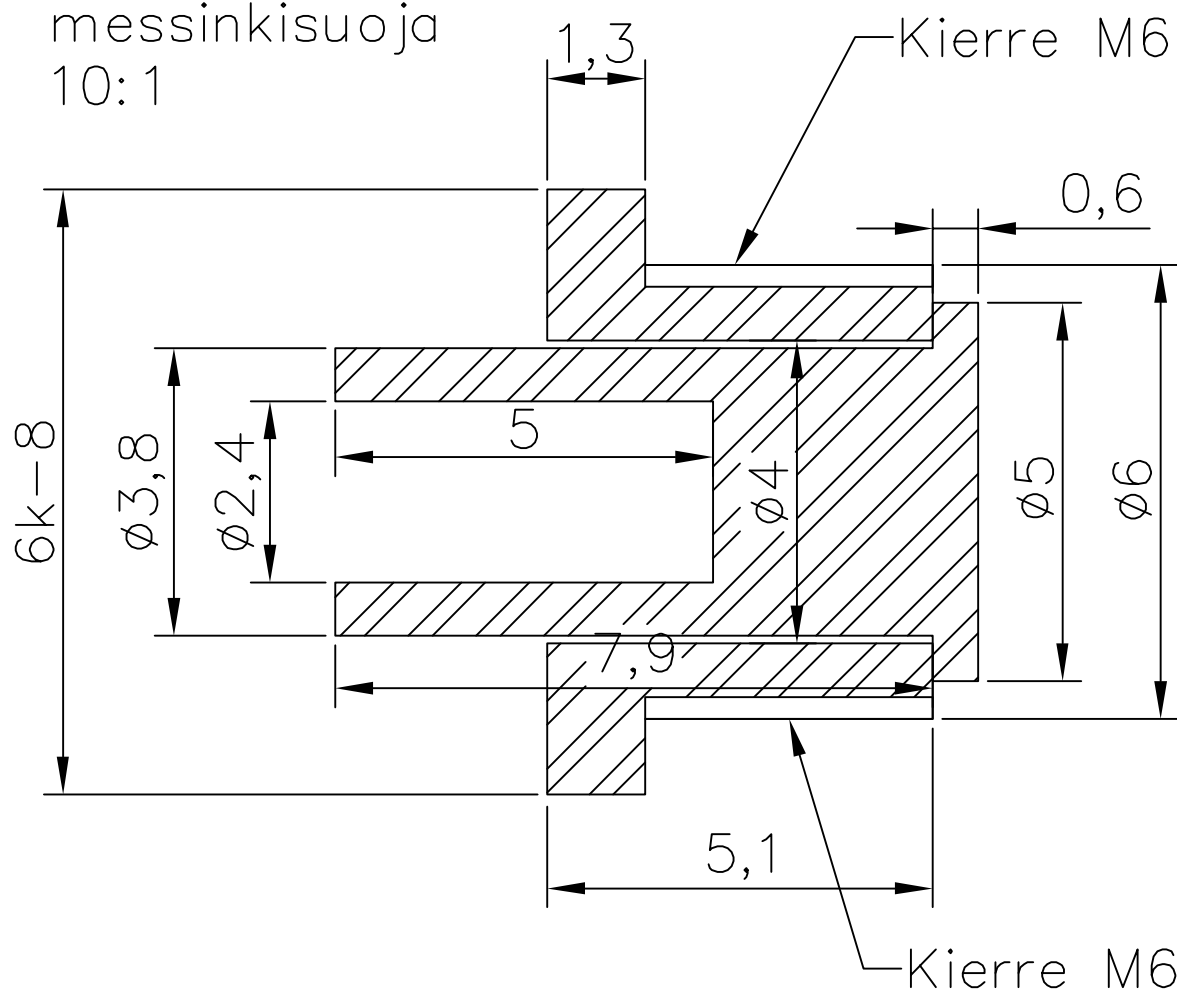




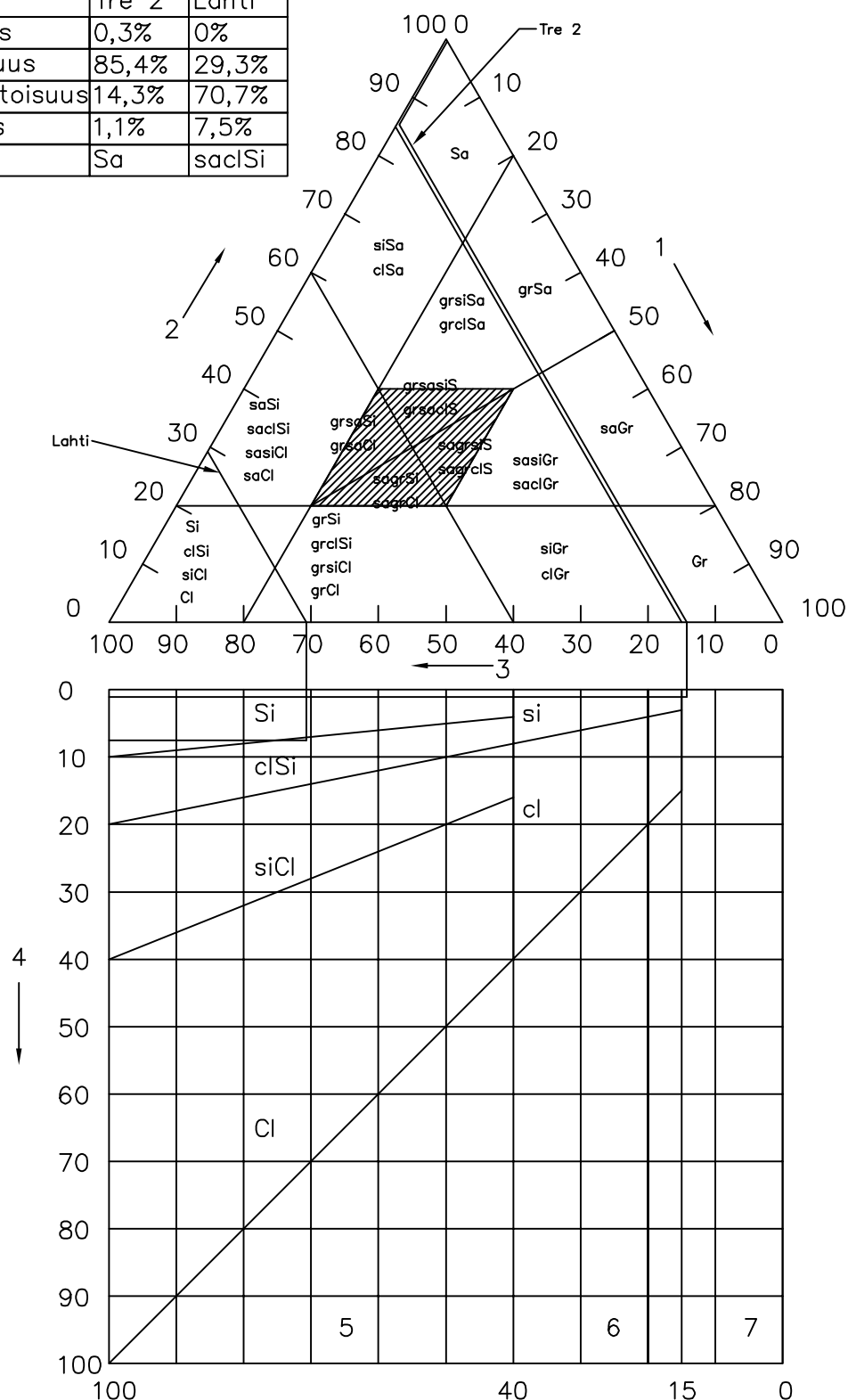
Leikkaus Q-Q
1:2



DET 2 Anturin
messinkisuoja
10:1



	Tre 2	Lahti
Sorapitoisuus	0,3%	0%
Hiekkapitoisuus	85,4%	29,3%
Hienoainespitoisuus	14,3%	70,7%
Savipitoisuus	1,1%	7,5%
Maalaji	Sa	sacI Si



1. sorapitoisuus (2mm – 63mm)
 2. hiekkapitoisuus (0,063mm – 2mm)
 3. hienoainespitoisuus (< 0,063mm)
 4. savipitoisuus % karkean ja hienon maa-aineksen (raekoko < 63mm) massasta
 5. hienot maa-ainekset (siltti ja savi)
 6. sekarakeiset maa-ainekset (silttinen tai savinen sora ja hiekka)
 7. karkeat maa-ainekset (sora ja hiekka)
- S maa

Kelpoi- suus- luokka	Läpäisy-% pesuseulonnassa		Routaturpoama t (%)		E-moduuli (MPa)		Informatiivisia tietoja		
	0,063 mm seula	2 mm seula	Kuiva	Märkä	Kuiva	Märkä	Geo- maalajilu- kitus	Routivuus	Mahdol- linen käyttökoh- de
S1	alle 7	alle 70	0	0	100	100	Sr, srHk, (SrMr, srHkMr)	routimaton	jakava kerros
S2 ¹⁾	7 – 15	alle 70	0	3	70	50	SrMr, srHkMr	lievästi routiva	penger, stabilointi
S3	16 – 30	alle 70	3	6	50	35	SrMr, srHkMr	routiva	penger kuivana
S4	31 – 50	alle 70	6	12	35	20	siSrMr	routiva	penger kuivana
H1	alle 7	yli 70	0	0	70	70	Hk, (HkMr)	routimaton	suodatin
H2 ²⁾	7 – 15	yli 70	3	3	50	50	Hk, HkMr	lievästi routiva	suodatin
H3	16 - 30	yli 70	6	12	35	20	Hk, HkMr	routiva	penger kuivana
H4	31 – 50	yli 70	6	12	35	20	siHk, siHkMr	routiva	penger kuivana
U1	yli 50		12	16	20	20	Si, SiMr, kerrall. Sa/Si ³⁾	erittäin routiva	maaston muotoilut, läjitys
U2	yli 50			6 ⁴⁾		35	Jäykkä Sa ₅₎	routiva	
U3	yli 50			6 ⁴⁾		10	Pehmeä Sa ₅₎	routiva	
U4	yli 50			6		10	Lj	routiva	

- 1) Kuuluu luokkaan S1, jos läpäisyprosentti 0,02 mm kohdalla on alle 3.
- 2) Kelpoisuusluokan H2 hiekka, joka täyttää suodatinkerroksen laatuvaatimukset ja näytteet tutkitaan ohjeen TYLT Kerros- ja pengerrakenteet mukaisesti: E = 70 MPa, t = 0 % (vaikka muuten E olisi pienempi ja t olisi suurempi).
- 3) Kerrallinen savi/siltti (Sa/Si) on maata, jossa saven joukossa on ainakin paikoin silttikerroksia tai sitäkin karkeampia (vettä johtavia) kerroksia.
- 4) Saven paikallinen routaturpoama voidaan määrittää myös takaisinlaskennalla lähistön olemassa olevan tien routanousuhavainnoista.
- 5) Savi (Sa) on jäykkä, kun siipikairalla määritetty leikkauslujuus on vähintään 40 kPa ja pehmeää, kun leikkauslujuus on alle 40 kPa.